

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

**Р. Б. Медведєв**

## **Керування хіміко-технологічними процесами**

**Навчальний посібник**

*Видання друге, виправлене і доповнене*

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів,  
які навчаються за спеціальністю  
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2012

УДК 66.012-52(075.8)  
ББК 35-5-05я73  
М42

Рекомендовано Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України  
(Лист № 1/11-10324 від 08.11.2011 р.)

Рецензенти:

*А. А. Туник*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний авіаційний університет

*А. П. Ладенюк*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний університет харчових технологій

*Ю. М. Кодряко*, канд. техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

Відповідальний  
редактор

*Г. О. Сивак*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

Мелведєв Р. Б.  
М42 Керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. /  
Р. Б. Мелведєв – Вид. 2-ге, випр. і доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 192 с.  
Бібліогр.: с. 189–191. – 400 пр.  
ISBN 978-966-622-536-1

Висвітлено питання, пов'язані з керуванням хіміко-технологічними процесами. На основі неперервних і дискретних моделей динамічних процесів виконано розрахунки локальних систем керування і застосування пакету програм, побудованих на основі числових методів. Досліджено автоматизовані системи керування на прикладі технології виробництва аміаку із зведеного газу. Розглянуто інші технологічні об'єкти керування, які використовують у процесах водондготовки другого коксування ізохмних електростанцій, розміщених на території України. Значну увагу приділено питанням методології проектування, розроблення програмного забезпечення інформаційного та керувального режимів роботи цих систем.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

УДК 66.012-52(075.8)  
ББК 35-5-05я73

ISBN 978-966-622-536-1

© Р. Б. Мелведєв, 2012  
© НТУУ «КПІ» (ХТФ), 2012

## ЗМІСТ

Список скорочень.....	4
ВСТУП.....	7
1. КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ.....	9
1.1. Неперервні моделі стану.....	9
1.1.1. Моделювання динаміки технологічного процесу.....	10
1.1.2. Рішення рівнянь стану, програма RRS.....	25
1.1.3. Визначення стаціонарної робочої точки, програма RRT.....	29
1.1.4. Лінеаризація моделей стану, програма LMS.....	34
1.1.5. Модель стану замкнутого контуру керування, програма RSK.....	36
1.2. Безперервні моделі вхід-вихід.....	45
1.2.1. Зв'язок між моделлю стану і моделлю вхід-вихід, програма SWW.....	47
1.2.2. Розрахунок власних значень, програма RHP.....	51
1.3. Дискретні лінійні моделі.....	58
1.3.1. Дискретизація моделей стану.....	59
1.3.2. Вирішення рівнянь стану, програма DES.....	61
1.3.3. Дискретні моделі "вхід — вихід".....	65
1.3.4. Зв'язок між дискретною та безперервною передавальними функціями.....	70
1.3.5. Вирішення дискретного диференціального рівняння, програма DWW.....	73
2. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕ—САМИ.....	76
2.1. Технологічні об'єкти керування (ТОК) і автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСКТП).....	76
2.1.1. Основні поняття АСКТП.....	76
2.1.2. Технологічні об'єкти керування в процесах переробки газових Сумішей.....	80
2.1.3. Технологічні об'єкти керування у процесах водо підготовки другого контуру.....	89
2.1.4. Класифікація АСКТП.....	92
2.2. Передпроектні стадії розробки АСКТП.....	96
2.2.1. Методологія проектування АСКТП.....	96
2.2.2. Методика техніко-економічного аналізу ТОК.....	101
2.2.3. Технічне завдання.....	107
2.3. Проектування та розробка АСКТП.....	123
2.3.1. Проектування та розробка інформаційного забезпечення.....	123
2.3.2. Проектування та розробка програмного забезпечення керуючого режиму АСКТП.....	137
2.3.3. Підвищення ефективності розробки ПЗ АСКТП.....	144
2.3.4. Технічні засоби АСКТП.....	152
Додаток.....	162
Список літератури.....	189

### Список скорочень

- АВС – азотокислова суміш  
АВТ – азот високого тиску  
АЕС – атомна електростанція  
АСВК – автоматизована система вироблення керувань  
АСКТП – автоматизована система керування технологічними процесами  
АСКВ – автоматизована система керування виробництвом  
АСОД – автоматизована система оброблення даних  
АЦДП – алфавітно-цифровий друкувальний пристрій  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
БВАС – блок вводу аналогових сигналів  
БВДС – блок вводу дискретних сигналів  
БВивАС – блок виводу аналогових сигналів  
БВивДС – блок виводу дискретних сигналів  
БД – база даних  
БЗУ – блочна засполююча установка  
БК – блок ідентифікації контролера  
БПІМ – бібліотека програмного прикладного модулю  
БКК – блок керування контролером  
ВО – виконавчий орган  
ВХР – водно-хімічний режим  
Д – датчик  
ДЗ – дійсне значення параметра  
ДК – дистанційне керування  
ДКМВР – диспетчер керувальних модулів вироблення рекомендацій  
ДП – датчик переривання  
ЕЕ – економічний ефект  
ЗП – значення параметра  
КАК – конструктор алгоритмів керування  
КАС – комутатор аналогових сигналів  
КБ – код букви  
КТ – коксовий газ  
КДС – комутатор дискретних сигналів

- КМВ – кам'яновугільне масло  
КОК – керувальний обчислювальний комплекс  
КП – пристрій керування  
КФ – файл керувальних параметрів  
ЛТК – логіко-технологічний контроль  
МК – модуль керування  
НДР – науково-дослідні роботи  
НП – номер параметра  
НФ – номер формули розрахунку  
ОВ – ознака відповіді  
ОК – ознака параметра керування  
ОО – ознака оброблення  
ОУ – ознака усереднення  
ОФ – ознака фільтрації  
ПВ – пристрій виводу  
ПВВ – пристрій вводу  
ПДІ – перетворювач дискретної інформації  
ПЗ – програмне забезпечення  
ПКК – пристрій кодового керування  
ПМ – програмні модулі  
ПОРФ – програма обслуговування і редагування файлів  
ПП – пульт програміста  
ППД – пристрій послідовного друку  
ППІ – первинна переробка інформації  
ПППМ – набір прикладних програмних модулів  
ПТО – пульт технолога-оператора  
ПЦК – пряме цифрове керування  
ПЧІ – перетворювач число-імпульсної інформації  
РП – робочий проект  
САР – система автоматичного регулювання  
СКБД – система керування базою даних  
Т – таймер  
ТЕО – техніко-економічне обґрунтування  
ТЕП – техніко-економічні показники  
ТЗ – технічне завдання

- ТОК – технологічний об'єкт керування  
ТП – технічний проєкт  
У – підсилення  
УАП – уніфікований аналоговий перетворювач  
ФЗД – фільтр змінної дії  
ХТП – хіміко-технологічний процес  
ЦАП – цифроаналоговий перетворювач  
ЦПІ – цифро-імпульсні перетворення  
ЦО – цикл опитування  
ШВ – шифр відділення  
ШД – шина даних  
ШК – шина керування  
ШЛ – шифр лінії  
CEE – Control Execution Environment  
OPC – OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control  
SCE – Simulation Control Execution  
VBA – Visual Basic for Application  
WP – підпрограма розрахунку вхідних параметрів



## ВСТУП

Посібник містить два розділи, зокрема у першому розглянуто методи розрахунку неперервних і дискретних моделей динамічних процесів і контурів керування у часовій області. На відміну від відомих інженерних методів «класичної» теорії керування, в основу якого покладено оброблення емпіричного матеріалу, використання перетворення Лапласа, графічне зображення та наступне аналізування різних характеристик тощо, сучасна теорія ґрунтується на методах обчислювальної математики. Саме внаслідок цього в першому розділі задачі моделювання та розрахунку динамічних процесів, що перебігають в об'єктах і контурах керування, подані разом із комплексом прикладних програм, побудованих на основі обчислювальних методів, а саме: методів розв'язання систем звичайних диференціальних і нелінійних алгебраїчних рівнянь моделі в околі робочої точки, обчислення власних значень матричних рівнянь для оцінювання динамічних властивостей лінійних систем, дискретизації рівнянь моделей стану та їх розв'язання, методів використання z-перетворення.

Наразі немає ніяких протиріч між частотними методами та методами простору станів, у першому розділі навчального посібника порушено також питання взаємозв'язку між ними. Таку тезу сьогодні підтверджено у навчальній літературі з частотних методів, передусім у книгах О. А. Фельдбаума, В. А. Воронова, В. С. Пугачова, О. Г. Івахненка, О. І. Кухтенка, В. Я. Ротача, В. Л. Перова та ін.

Щодо навчальної літератури з сучасної теорії керування, то, крім книг В. В. Ажогіна, М. З. Згуровського [1; 2; 10] та деяких інших, слід назвати перекладні видання У. Рєя, Ю. Ту, Ф. Чакі, Р. Ізермана [11; 24; 27; 29], а також підручники К. А. Пупкова та М. Д. Єгупова [8], В. А. Подчукаєва [22] та І. В. Мірошника [19; 20].

У другому розділі посібника розглянуто комплекс питань, пов'язаних із розробленням автоматизованих систем керування техно-

логічними процесами (АСКТП) у хімічній галузі промисловості. Велику увагу приділено методології проектування програмного забезпечення інформаційного та керувального режимів роботи цих систем. Як базові були обрані технологічні процеси переробки газових сумішей, реалізовані у виробництві аміаку з коксового газу та водопідготовки другого контура атомної електростанції (АЕС). Такий вибір був зумовлений двома обставинами: по-перше, ці процеси передають різноманітність хімічної технології у повному обсязі, по-друге – для виробництва аміаку із коксового газу вже була створена система керування, а отже, є накопичений досвід практичної реалізації процесів проектування, розроблення та експлуатації АСКТП [6; 21].

В основу посібника покладено матеріали курсів лекцій із обчислювальних методів, керування хіміко-технологічними процесами (ХТП), програмного та інформаційного забезпечення АСКТП.

Призначено для інтенсивного комп'ютерного вивчення прикладних аспектів сучасної теорії керування; набуття навичок для практичного вирішення реальних задач автоматизації ХТП; опанування методології проектування АСКТП у хімічній галузі промисловості.



## Частина I

# КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ

## Глава 1. Безперервні моделі стану

Розглянемо систему автоматичного керування технологічним процесом з одним входом і одним виходом (рис. 1.1).

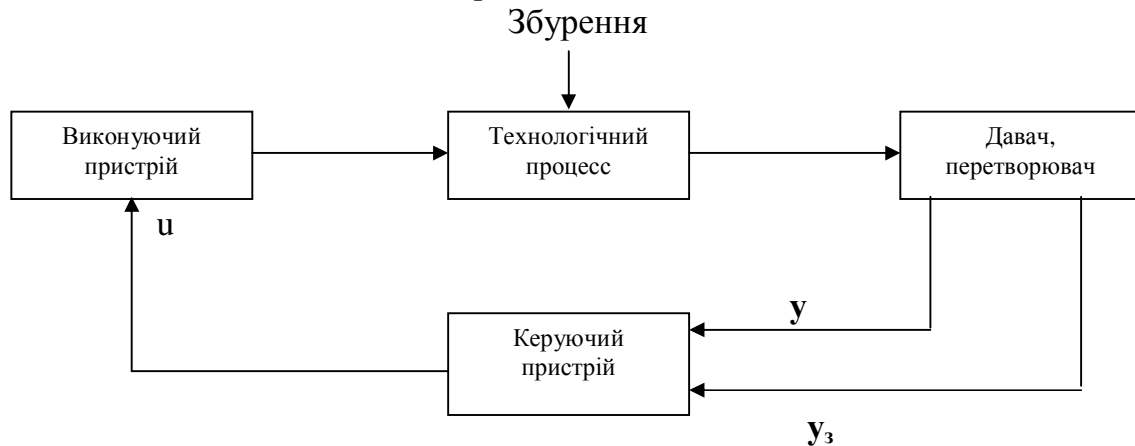


Рис. 1.1. Система автоматичного керування технологічним процесом

Зовнішнє діяння  $u$  формується керуючим пристроєм як результат порівняння дійсного значення  $y$  з його заданим значенням  $y_3$ . Звичайний "класичний" керуючий пристрій (регулятор) із зворотним зв'язком виробляє керування, яке є функцією міри помилки:

$$u(t) = u \left\{ H \left[ y(t), y_3(t) \right] \right\}, \quad (1.1)$$

де  $H[\bullet]$  — міра помилки, що характеризує різницю між дійсним значенням виходу та завданням  $y(t) — y_3(t)$ . Таке керування не враховує явно можливих майбутніх розходжень між бажаним і фактичним виходами (рис. 1.2,а).

На противагу цьому оптимальне керування враховує розходження між фактичним і бажаним виходами в майбутньому. При такому керуванні, керуючий пристрій формує  $u(\tau)$  на всьому  $t_0 + t_0 + t_k$  інтервалі керування (рис. 1.2,б). Для того щоб оптимальне керування було можливим, потрібна інша міра помилки. З метою встановлення цієї міри використовується критерій якості, що дорівнює значенню інтеграла такого загального вигляду:

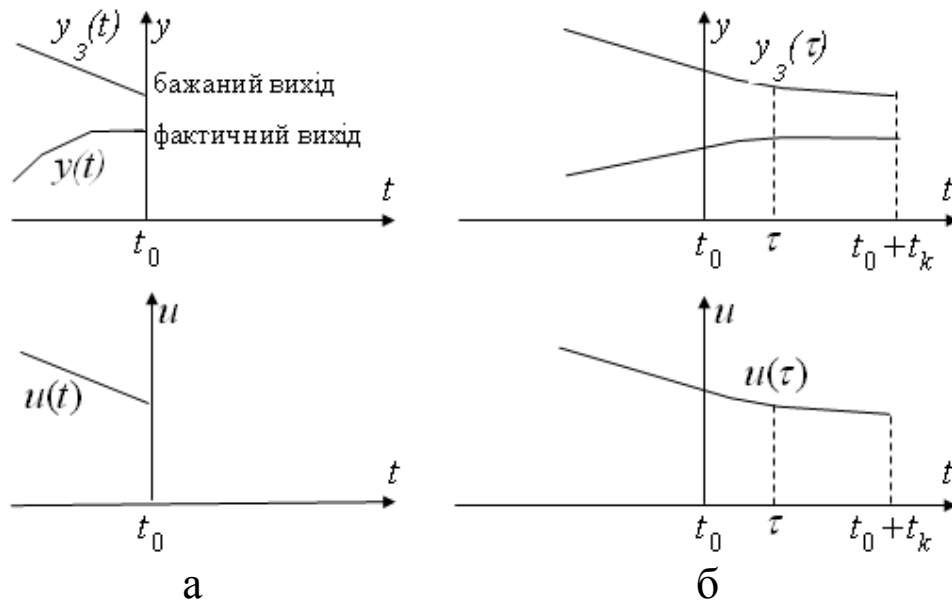


Рис. 1.2. Звичайне та оптимальне керування

$$Q = \int_{t_0}^{t_0 + t_k} H[y_3(t), y(t)] dt, \quad (1.2)$$

або, найчастіше, використовується квадратична міра помилки:

$$Q = \int_{t_0}^{t_0 + t_k} [y_3(t) - y(t)]^2 dt. \quad (1.3)$$

Таким чином, щоб визначити керування, яке потрібно подати на виконуючий пристрій технологічного процесу, необхідно вміти передбачати його реакцію на деяку численність можливих керуючих діянь. Таке передбачення може бути одержано через модель динаміки технологічного процесу.

### 1.1. Моделювання динаміки технологічного процесу

Модель технологічного процесу потрібна для проектування керуючого пристрою, або, точніше, для закладеного в ньому закону керування. З цією метою динаміка технологічного процесу може бути описаною у часовій області за допомогою диференціальних рівнянь. Слід зазначити, що мова йде саме про модель динаміки стосовно задач керування, а не будь-яких інших задач, пов'язаних з іншими якостями технологічного процесу.

Математична модель динаміки реального технологічного процесу є

компромісом між її адекватністю процесу, що описується, з одного боку, і зручністю її використання для рішення конкретної технологічної задачі, з іншого. Від точності моделі в усіх випадках залежить якість керування. Чим точніше збудована модель і чим більший ступінь адекватності моделі реальному процесу, тим, звичайно, точніше вирішується задача керування. Однак збільшення точності математичного опису об'єкта пов'язано із збільшенням витрат часу та інших ресурсів на розробку самої моделі. Крім того, ускладнюється сам закон керування і, що істотно, його технічна реалізація.

Серед способів одержання математичного опису (моделі) технологічного процесу виділимо два головних:

1. Опис, який здобувається через використання основних фізичних законів, таких як закон збереження речовини, енергії та ін. Цей підхід до моделювання може бути охарактеризовано як аналітичний.

2. Опис, що будується на інформації, одержаній у експерименті. Такий експериментальний підхід можливий лише для вже реалізованих, існуючих фізично технологій.

Кожний з перелічених способів побудови математичної моделі має свої переваги і недоліки. Перевагами аналітичного підходу можна вважати:

а) відображення в математичній моделі найбільш важливих фізичних величин в безпосередній, доступній формі, на стадії проектування;

б) простота подання нелінійних залежностей;

в) простота опису багатовимірних процесів.

До недоліків слід віднести:

а) при неточності або відсутності достатньої апріорної інформації кількість невизначених параметрів буде великою;

б) модель може вийти надмірно складною.

Переваги експериментального підходу:

а) найбільш доцільна форма математичного опису при використанні інженерних методів "класичної" теорії керування;

б) простота та ефективність одержання оцінок параметрів;

в) мінімальна кількість параметрів стосовно лінійних одноканальних систем.

Недоліки експериментального підходу:

а) непридатність для опису нелінійних систем;

б) мала ефективність при опису багатовимірних процесів.

У зв'язку з тим, що подальше викладення матеріалу пов'язане з поняттям стану, дамо деякі пояснення.

Під станом системи будемо розуміти сукупність величин, які повністю визначають її положення в даний момент часу. Стан системи відіграє роль початкових умов для усього майбутнього її руху. Так, для сукупності матеріальних точок стан — це інформація про історію системи, достатня для того, щоб передбачити вплив минулого на майбутнє. Вперше опис руху механічних систем за допомогою зображення точки в просторі станів зробив А.Пуанкаре (кінець XIX століття). Початкові умови в  $n$ -вимірному просторі станів утворюють  $n$ -вимірний вектор, який повністю визначає стан системи в початковий момент часу. Цей вектор називають вектором стану системи, а його компоненти — змінними стану.

Для опису хіміко-технологічних систем у просторі станів цілком логічно вважати компонентами вектора стану конкретні фізичні величини (температури, рівні, концентрації тощо). Визначимо вектори параметрів, що характеризують керований хіміко-технологічний процес (рис. 1.3): 1)  $U$ -вектор керування; 2)  $X$ -вектор стану; 3)  $Y$ -вектор виходу; 4)  $Z$ -вектор збурень;  $Z'$ -підвектор — неозначності, що вносяться при керуванні органами реалізації керуючих діянь;  $Z''$ -підвектор — збурення, прикладені до керованого процесу;  $Z'''$ -підвектор — похибки та неоднозначності, що вносяться давачами технологічних параметрів та результатами лабораторних аналізів.

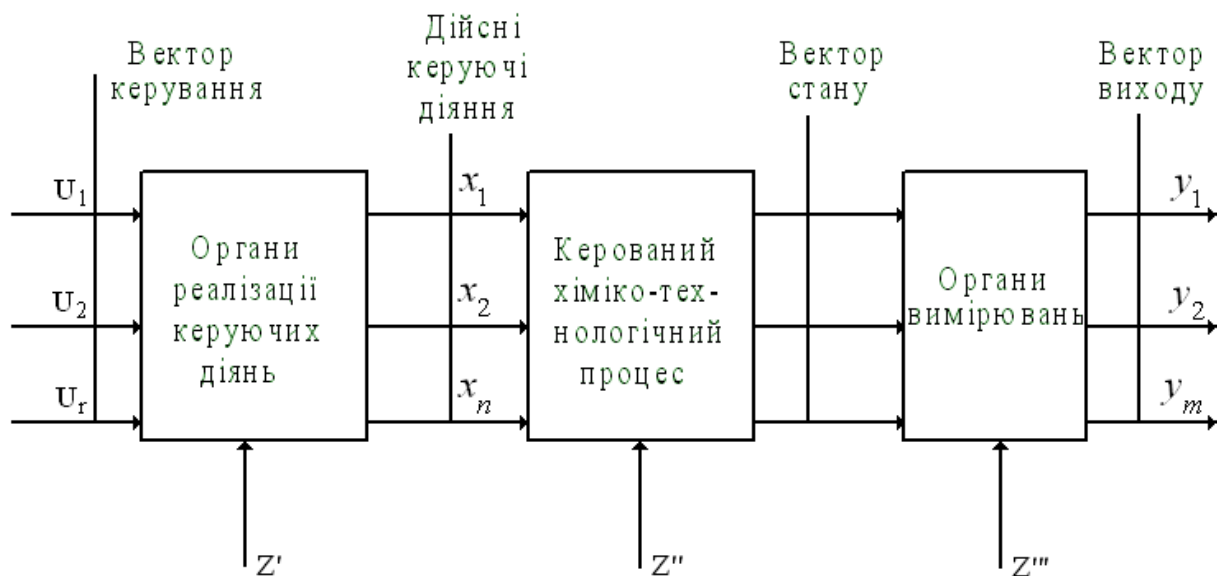


Рис. 1.3. Керований хіміко-технологічний процес

Характерною рисою динамічного хіміко-технологічного процесу є те, що його поведінка за часом визначається не тільки силами, діючими в цей момент, але залежить також від діянь, які існували в

минулому. Зважаючи на це можна сказати, що динамічний процес має пам'ять (рис. 1.4).

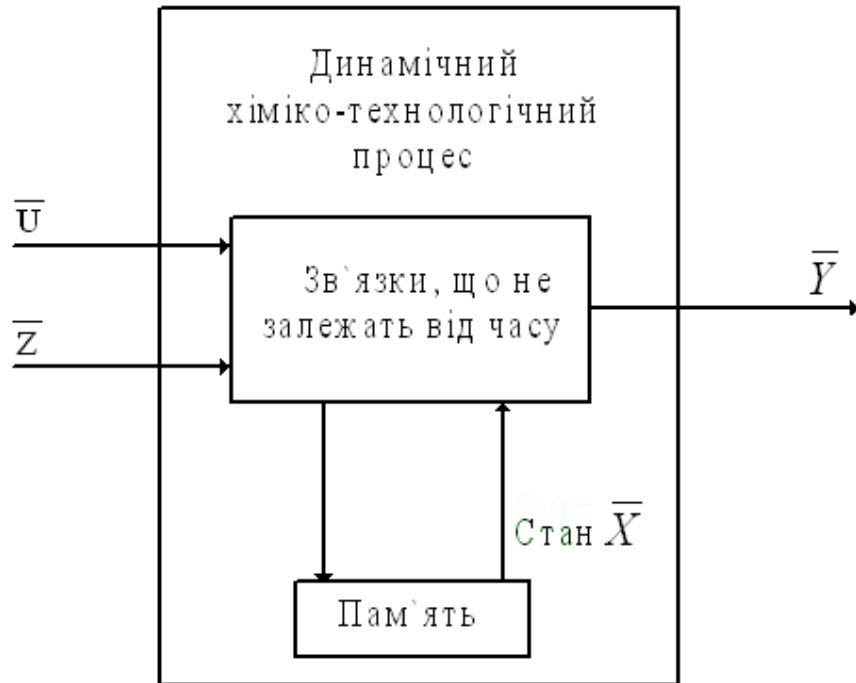


Рис. 1.4. Керований динамічний процес

Для реальних хіміко-технологічних процесів існування такої пам'яті може бути обумовлено присутністю у технологічних схем ємностей, де акумулюється речовина або енергія. Як відомо, зміна кількості речовини або енергії в ємності не може статися миттєво.

Для того щоб описати розвиток процесу за часом, приймається гіпотеза про те, що майбутній стан процесу залежить від стану в початковий момент; від значень керуючих діянь і збурень на інтервалі керування. Тоді мірою зміни процесу за часом буде, згідно із щойно прийнятими позначеннями векторів, похідна від вектора стану за часом:

$$\frac{d\bar{X}(t)}{dt} = \bar{F}[\bar{X}(t), \bar{U}(t), \bar{Z}(t)] \quad (1.4)$$

Рівняння (1.4) зв'язує стан процесу із входами (керуючими діями та збуреннями). Крім того, для повного опису технологічного процесу необхідні ще рівняння зв'язків "вихід-стан" та прямий ("транзитний", без пам'яті) вплив керуючих діянь на вихід:

$$\bar{Y}(t) = \bar{G}[\bar{X}(t), \bar{U}(t)] \quad (1.5)$$

До цього треба додати стан в початковий момент

$$\bar{X}(t_0) = \bar{X}_0 \quad (1.6)$$

і зазначити, що в (1.4) та (1.5)  $\bar{F}$  та  $\bar{G}$  в загальному випадку — нелінійні вектор-функції.

В сучасній теорії керування широко розповсюджений спосіб лінеаризації,

тобто переходу від нелінійних до лінеаризованих моделей, причому процедура лінеаризації виконується в околі деякого бажаного стану та, відповідно, виходу. Суть процедури ми розглянемо дещо пізніше (п.1.4), а зараз тільки зазначимо, що йдеться про той випадок, коли вектор-функції  $\bar{F}$  та  $\bar{G}$  відображають лінійні залежності між чотирма векторами:  $\bar{U}, \bar{X}, \bar{Z}, \bar{Y}$ . Тоді модель динаміки набуде такої форми:

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}} = A \cdot \bar{X} + B \cdot \bar{U} + V \cdot \bar{Z} \\ \bar{Y} = C \cdot \bar{X} + D \cdot \bar{U} \\ \bar{X}(t_0) = \bar{X}_0 \end{cases} \quad (1.7)$$

де

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & b_{1r} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & b_{nr} \end{pmatrix};$$

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & v_{1l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ v_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & v_{nl} \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{mn} \end{pmatrix}; \quad D = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{1r} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{mr} \end{pmatrix};$$

Матриця  $A$  називається матрицею системи,  $B$  — матрицею керування,  $C$  — матрицею спостережень,  $D$  — матрицею транзиту.

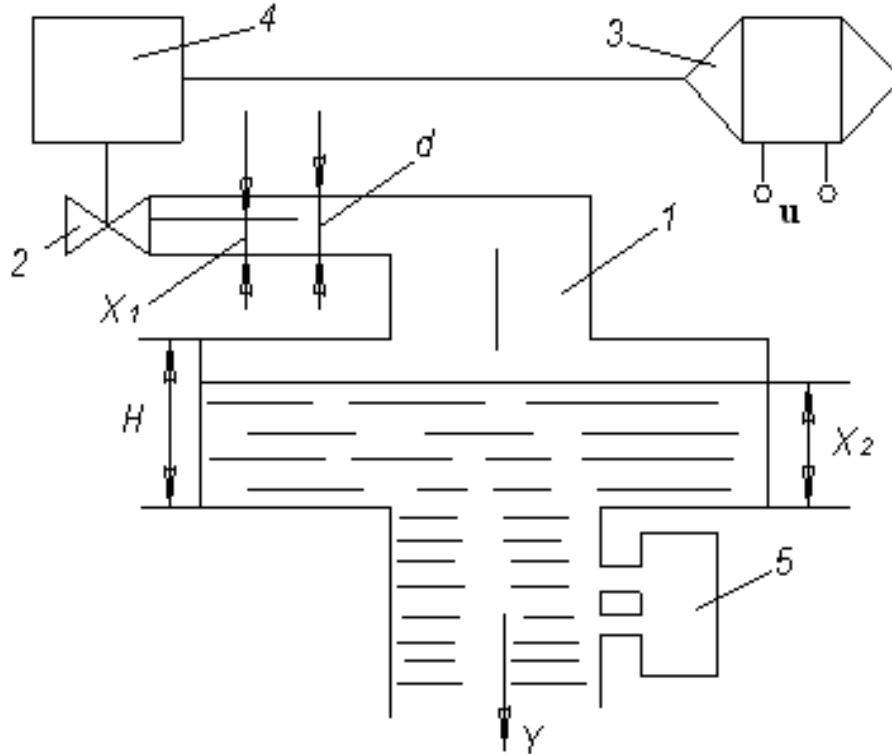
Одне з центральних місць в математичних моделях посідають рівняння балансу маси та енергії, які складаються згідно з загальною формою:

$$\begin{bmatrix} \text{швидкість} \\ \text{накопичування} \\ \text{властивості} \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} \text{швидкість} \\ \text{входу} \\ \text{властивості} \end{bmatrix} - \sum \begin{bmatrix} \text{швидкість} \\ \text{виходу} \\ \text{властивості} \end{bmatrix} + \\ + \sum \begin{bmatrix} \text{швидкість утворення} \\ \text{властивості у процесі} \end{bmatrix}.$$



Реалізувати таку загальну форму дозволяють рівняння стану або рівняння руху об'єкта (1.4), а також рівняння виходу або рівняння вимірювань (1.5). Розглянемо деякі приклади.

**Приклад 1.** Модель у формі "вхід-стан-вихід" (рис. 1.5).



Об'єкт керування — ємність з одним вхідним потоком. Стан об'єкта визначається позицією  $x_1$  клапана вентиля та рівнем  $x_2$  рідини, керуюче діяння — напругою  $U_1$ , вимірюваний вихід — видатком  $u_1$  рідини, що витікає.

Припускаючи, що швидкість обертання виконавчого двигуна пропорційна  $U_1$ , дістанемо для  $X_1$ :

$$\frac{dx_1}{dt} = k_1 u_1, \quad 0 \leq x_1 \leq d, \quad (1.9)$$

що справедливо для всіх  $x_1$ . Далі, припускаючи, що вільна поверхня притоку лінійно залежить від  $x_1$ , дістанемо для  $x_2$ :

$$\frac{dx_2}{dt} = k_2 x_1 - k_3 x_2, \quad 0 \leq x_2 \leq H. \quad (1.10)$$

При незмінному перетині труби стоку видаток рідини є пропорційний гідростатичному тиску, який, в свою чергу, пропорційний рівню рідини (рівняння виходу):

$$y = k_3 x_2. \quad (1.11)$$

Рівняння стану об'єкта можна поєднати в одне векторно-матричне рівняння стану:

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ K_2 - K_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

або

$$\dot{X} = AX + BU,$$

де

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ K_2 - K_3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} K_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} U_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Рівняння виходу також може бути подане у векторно-матричній формі:

$$Y = (0 \quad K_3) \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad \text{або} \quad Y = C \cdot X, \quad (1.13)$$

$$\text{де} \quad C = (0 \quad K_3).$$

Початкові умови:  $x(0) = (x_1(0), x_2(0))^T$ .

Нерівності  $0 \leq X_1 \leq d$ ,  $0 \leq X_2 \leq H$  визначають припустиму множину станів, а фізична неможливість реалізації напруги живлення двигуна більшої за деяку величину, визначає припустиму множину керувань. Таким чином, модель об'єкта керування, сформульована в термінах "вхід-стан-вихід", складається із рівняння стану; рівняння виходу; початкових умов; припустимої множини станів; припустимої множини керувань.

Розглянута в прикладі модель ємності виявилася лінійною, детермінованою, стаціонарною та безперервною.

Загальний вигляд такої моделі:

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}} = A \cdot \bar{X} + B \cdot \bar{U}, & \bar{X}(0) = \bar{X}_0; & A[n \times n] \\ \bar{Y} = C \cdot \bar{X} & B[n \times r]; & C[m \times n] \end{cases} \quad (1.14)$$

**Приклад 2. Математична модель двовимірного об'єкта (рис. 1.6).**

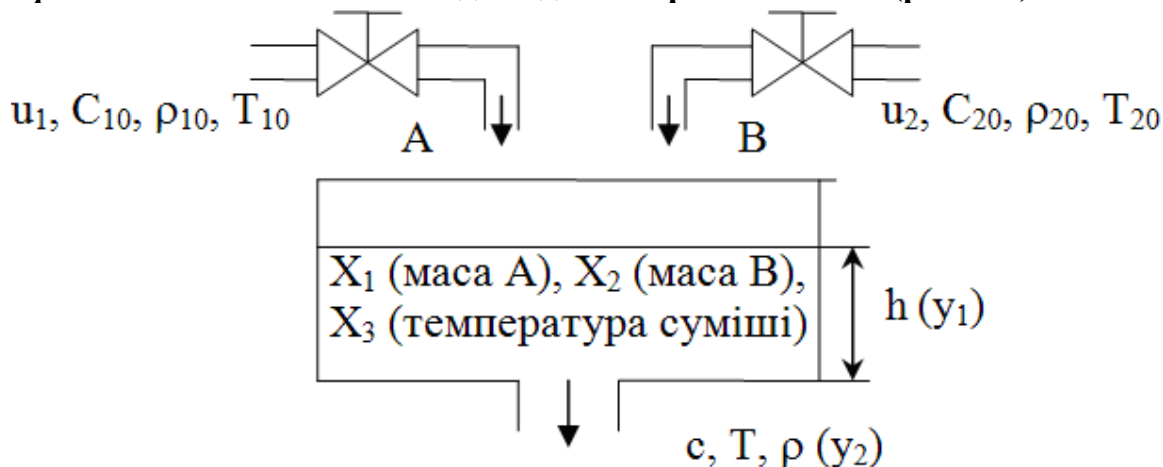


Рис.1.6. Ємність з двома вхідними потоками

Розробимо математичну модель для ємності з двома вхідними потоками рідини, компонентами А та В.

Ціллю керування є підтримка заданого рівня в ємності та складу вихідного потоку. Якщо припустити, що в ємності відбувається ідеальне перемішування рідин, то це означатиме, що фізичні параметри суміші в резервуарі (склад, температура, щільність, питома теплоємність) дорівнюють відповідним параметрам вихідного потоку. Розглянемо як керуючі діяння об'ємні швидкості  $u$ ,  $u$  подавання компонентів А та В (м/год).

Вимірюваними вихідними величинами є рівень рідини  $y_2 = h$  та щільність вихідного потоку  $y_2 = \rho$ . Враховуючи ціль керування, обираємо змінними стану масу компоненти А в суміші —  $x$  (кг), масу

компоненти В — х (кг) та температуру суміші Т — х (°С). Використовуючи єдиний підхід для складання рівнянь стану (1.8), дістаємо для маси рідини А в суміші:

$$\frac{0}{X_1} = u_1 r_{10} - \frac{k}{rS} x_1 \quad (1.15)$$

де  $\rho$  — щільність вхідного потоку компоненти А (кг/м);  $k$  — коефіцієнт пропорційності, що зв'язує рівень рідини з масовим вихідним потоком [кг/(м · год)];  $S$  — площа поперечного перерізу ємності (м<sup>2</sup>). Перший доданок описує вхідний потік компоненти А (кг/год), другий — масовий потік вихідної компоненти А. Якщо припустити, що сумарний масовий потік вихідної рідини  $Q$  (суміші А та В) є пропорційний рівню, то можна записати:

$$Q_b = kh = k \frac{x_1 + x_2}{rS} \quad (1.16)$$

З урахуванням того, що доля компоненти А у вихіднім потоці дорівнює  $x_1 / (x_1 + x_2)$ , дістаємо другий доданок в (1.15). Аналогічно для маси компоненти В:

$$\frac{0}{X_2} = u_2 r_{20} - \frac{k}{rS} x_2 \quad (1.17)$$

Для здобуття третього рівняння стану (відносно температури суміші) складемо баланс кількості теплоти в об'ємі  $V$ :

$$\frac{d}{dt}(VcrT) = u_1 c_{10} r_{10} T_{10} + u_2 c_{20} r_{20} T_{20} - \frac{k}{rS} cT(x_1 + x_2) + q(T_0 - T) \quad (1.18)$$

де  $T$  — температура навколишнього середовища, (°С);  $q$  — коефіцієнт теплопередачі крізь стінки ємності [Кдж/(град · год)];  $V = (x_1 + x_2) / \rho$  — об'єм суміші.

Перші два доданки правої частини рівняння балансу відповідають кількості теплоти, що вводиться потоками компонентів А і В в одиницю часу. Третій доданок описує кількість теплоти, що виходить з витікаючою рідиною в одиницю часу, а четвертий — кількість теплоти, що передається в навколишнє середовище (або одержується з нього).

Якщо припустити, що питома теплоємність суміші є постійною  $c = c_{10} = c_{20} = \text{const}$ , то враховуючи, що інші співмножники у добутку  $V$  з  $\rho$  та  $T$  змінюються за часом, дістаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(v c r T) &= c \frac{d}{dt} \left[ (x_1 + x_2) T \right] = c \left[ \left( \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \right) T + (x_1 + x_2) \dot{T} \right] = \\ &= c T \left[ u_1 r_{10} + u_2 r_{20} - \frac{k}{r S} (x_1 + x_2) \right] + c [x_1 + x_2] \dot{T} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Після підстановки та перетворень дістаємо третє рівняння стану:

$$\dot{x}_3 = \dot{T} = \frac{1}{x_1 + x_2} \left[ u_1 r_{10} (T_{10} - T) + u_2 r_{20} (T_{20} - T) + q (T_0 - T) \right] \quad (1.20)$$

Рівняннями виходу будуть

$$y_1 = \frac{x_1 + x_2}{r \cdot S} \quad (1.21)$$

$$y_{21} = \frac{x_1}{x_1 + x_2} r_1(x_3) + \frac{x_2}{x_1 + x_2} r_2(x_3) \quad (1.22)$$

В (1.22) припущено, що щільність суміші є адитивною відносно цільностей компонент  $\rho_1(x_3)$  та  $\rho_2(x_3)$ ; співмножники  $x_1/(x_1 + x_2)$  і  $x_2/(x_1 + x_2)$  передають вагові частки компонент.

Таким чином, здобуто математичну модель двовимірного об'єкта керування у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь стану (1.15), (1.17), (1.20) та алгебраїчних рівнянь виходу (1.21), (1.22), в загальній векторній формі можна зобразити у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}} = \bar{F}(\bar{X}, \bar{U}), \bar{X}(0) = \bar{X}_0; \\ \bar{Y} = \bar{G}(\bar{X}); \end{cases} \quad (1.23)$$

де  $\bar{X} = (x_1, x_2, x_3)^T$ ;  $\bar{U} = (u_1, u_2)^T$ ;  $\bar{Y} = (y_1, y_2)^T$ , а

компонентами нелінійних вектор-функцій  $F(X, U)$  та  $G(X)$  є праві частини цих рівнянь.

Крім перелічених до моделі входять змінні, котрі за нашими припущеннями не вимірюються:  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  та  $T_0$ , які слід розглядати як збурення, а також  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  — випадкові похибки вимірювань. Якщо замість діючих значень цих змінних підставити їхні середні значення, то в моделі з'являться випадкові вектори:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{X}} &= \bar{F}(\bar{X}, \bar{U}) + \bar{x}(t), \quad \bar{X}(0) = \bar{X}_0, \\ \bar{Y} &= \bar{G}(\bar{X}) + \bar{h}(t)\end{aligned}\tag{1.24}$$

На відміну від детермінованої, цю модель можна назвати стохастичною моделлю об'єкта керування. Слід також відзначити універсальність детермінованої моделі: вона може бути використана для різних пар компонентів А та В з відомими фізичними властивостями, різними геометричними розмірами ємкостей.

Приклад 3. Математичне моделювання технологічної установки транспортування газового потоку.

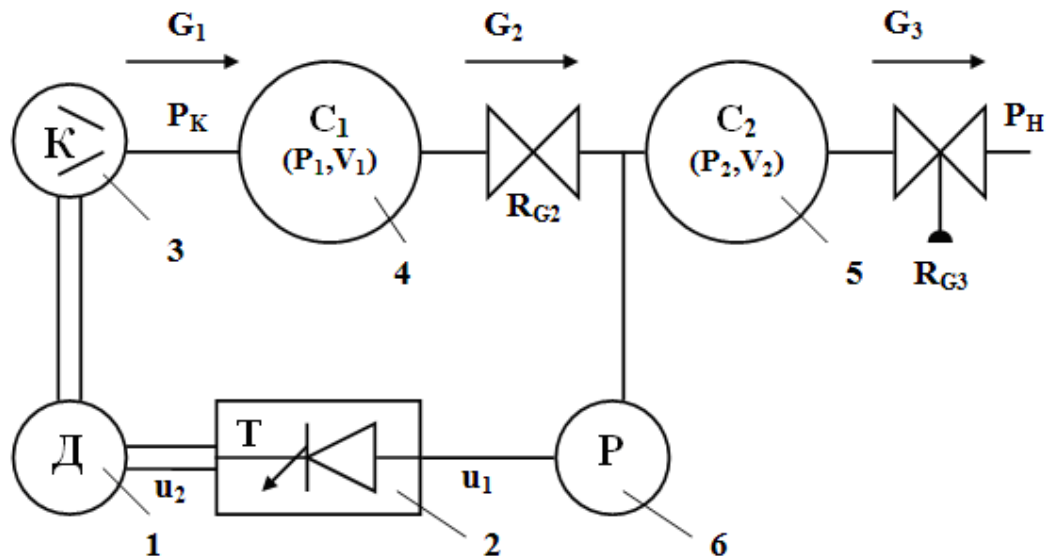


Рис. 1.7. Схема установки транспортування газового потоку: 1 — двигун; 2 — тиристор; 3 — компресор; 4, 5 — ємкості; 6 — регулятор потоку

На рис. 1.7 зображено схему технологічної установки, де електричний двигун (Д) з тиристорним керуванням (Т) обертає компресор (К), який поставляє потік газу  $G_1$ , у дві з'єднані послідовно ємкості ( $C_1$ ,  $C_2$ ) [10].

Регулятор Р регулює потік газу  $G_2$  (об'ємну швидкість) між ємкостями. Значення  $G_2$  треба стабілізувати на деякому заданому



рівні;  $R_{G2}$  — постійний опір потоку,  $R_{G3}$  — змінний (регульований) опір;  $P_K$  — тиск на виході компресора;  $P_1, P_2$  — тиск в ємкостях;  $P_H$  — тиск на навантаженні.

Вважаючи все, що зображено на рис. 1.7, як деяку технологічну систему, будемо розглядати в процесі моделювання окремо дві її підсистеми (агрегат та вузол).

### 1. Агрегат двигун-компресор.

Режим холостого ходу агрегату, коли навантаження відсутнє, досліджується при зміні керуючого сигналу  $u$  на виході тиристора в межах  $0 — 100\%$ . Внаслідок цього вихідний тиск компресора і міняється так, як показано на рис. 1.8.

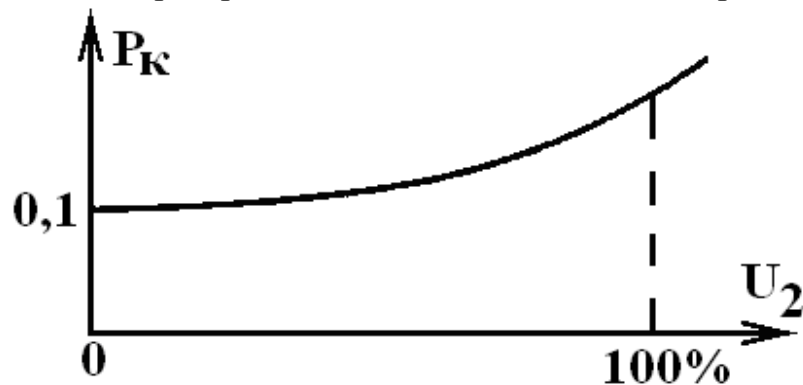


Рис. 1.8. Статична характеристика

Крива на рис. 1.8, тобто статична характеристика агрегату, може бути описана за таким виразом:

$$P_K = au_2^2 + b \quad (1.25)$$

Динамічну характеристику агрегату як реакцію на одиничний поштовх, показано на рис. 1.9.

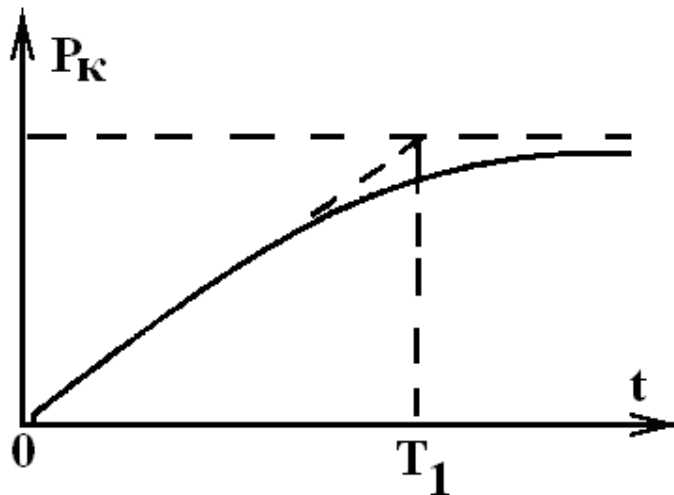


Рис. 1.9. Динамічна характеристика

Ця крива може бути апроксимована аперіодичною ланкою першого порядку. Тоді модель динаміки агрегату двигун-компресор буде мати вигляд:

$$T_1 \frac{dP_K}{dt} + P_K = au_2^2 + b, \quad (1.26)$$

звідки

$$\frac{dP_K}{dt} = \frac{1}{T_1} P_K + \frac{a}{T_1} u_2^2 + \frac{b}{T_1}. \quad (1.27)$$

Через те що всі дані (a,b,T<sub>1</sub>) одержані внаслідок обробки кривих, знятих безпосередньо на установці, перед нами динамічна модель, побудована за допомогою експериментального підходу. Значення цих та інших експериментальних даних наведені в табл.1.1, при цьому застосовані такі одиниці вимірювань: час, постійна часу — с; тиск, перепад тиску — МПа; об'єм — м<sup>3</sup>; потік — м<sup>3</sup>/с.

Таблиця 1.1

Експериментальні дані для установки  
транспортування газового потоку

Константа	Значення	Одиниці
a	2,1	МПа
b	0,1	МПа
T <sub>1</sub>	12,5	с
1/c	0,7	м <sup>3</sup> • МПа <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
d <sub>2</sub>	0,4	м <sup>3</sup> • МПа <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
d <sub>3</sub>	0,5	м <sup>3</sup> • МПа <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
RT	111	МПа
V <sub>1</sub>	444	м <sup>3</sup>
v <sub>2</sub>	333	м <sup>3</sup>

Режим навантаження агрегату двигун-компресор може бути зображений як залежність тиску Р в ємкості С від потоку G (рис. 1.10).

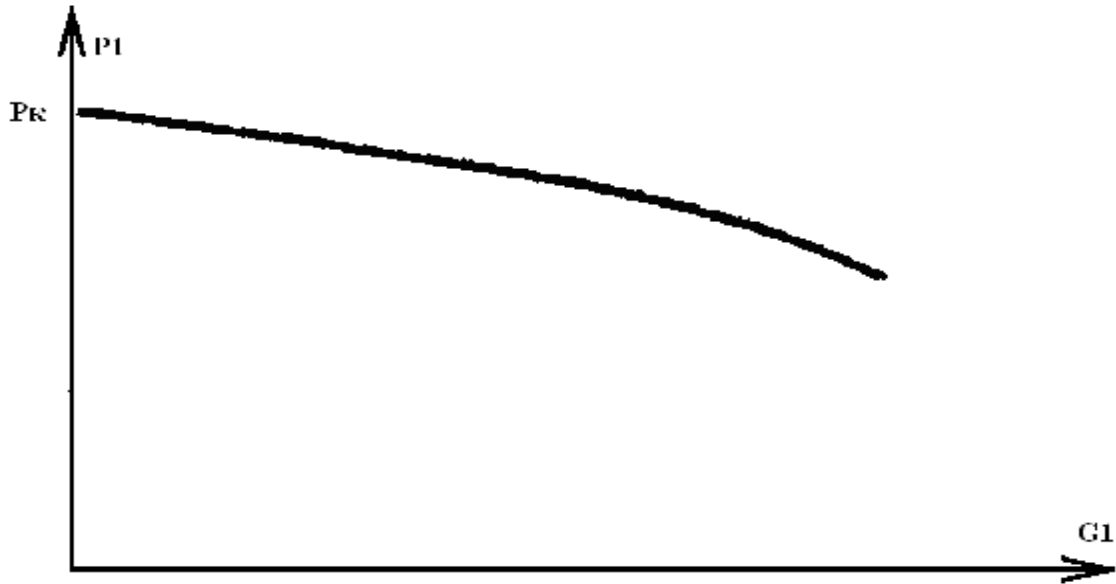


Рис. 1.10. Навантажувальна характеристика компресора

Навантажувальна характеристика компресора в припущенні лінійної залежності може бути апроксимована у вигляді:

$$P_1 = P_K - cG_1, \quad (1.28)$$

або для потоку:

$$G_1 = \frac{1}{c}(P_K - P_1), \quad (1.29)$$

де  $P_K$  — тиск холостого ходу,  $c$  — коефіцієнт (значення знаходиться в табл.1.1,  $1/c$ ).

## 2. Вузол ємностей.

Цей вузол промодельовано аналітично, виходячи з загальної форми (1.8).

Швидкість зміни маси ш в ємності  $C_1$ :

$$\frac{dm_1}{dt} = m_{G1} - m_{G2} = \rho_N (G_1 - G_2), \quad (1.30)$$

де  $\rho_N$  — щільність газу в нормальному стані;  $G_1$ ,  $G_2$  — об'ємні швидкості потоків.

Для маси  $m_1$ , із загального рівняння газового стану маємо:

$$m_1 = P_1 V_1 / (RT), \quad (1.31)$$

де  $R$  — константа, специфічна для речовини;  $T$  — абсолютна температура.

Перетворимо тепер (1.30) шляхом підстановки  $m_1$  з (1.31).  $G_1$ , з (1.29) та

перенесення  $\frac{dP_1}{dt}$  до лівої частини:

$$\begin{aligned}\frac{d[P_1 V_1 / (PT)]}{dt} &= r_N \left[ \frac{1}{c} (P_K - P_1) - G_2 \right] \\ \frac{V_1}{RT} \frac{dP_1}{dt} &= r_N \left[ \frac{1}{c} (P_K - P_1) - G_2 \right] \\ \frac{dP_1}{dt} &= \frac{r_N RT}{V_1} r_N \left[ \frac{1}{c} (P_K - P_1) - G_2 \right]\end{aligned}\quad (1.32)$$

Аналогічно для ємності  $C_2$  з масою  $m_2$  та внутрішнім тиском  $P_2$  можна записати:

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = m_{G2} - m_{G3} = r_N (G_2 - G_3), \quad (1.33)$$

або

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{RT r_N}{V_2} (G_2 - G_3), \quad (1.34)$$

Таким чином, залишаються ще відсутніми залежності для  $G_2$  та  $G_3$ . Ці величини залежать від тисків перед  $P_{вх}$  і після  $P_{вих}$  потокових опорів (на рис. 1.7 позначені  $R_G$ ), самих опорів та температури [12]. Загальний вираз для об'ємного видатку  $G$  буде:

$$G = kR \sqrt{\frac{(P_{вх} - P_{вих}) P_{вх}}{r_N T}}, \quad (1.35)$$

а конкретно для  $G_2$  та  $G_3$  після відповідних підстановок дістанемо:

$$G_2 = d_2 \sqrt{(P_1 - P_2) P_2}; \quad (1.36)$$

$$G_3 = d_3 R_{G3} \sqrt{(P_2 - P_H) P_H}. \quad (1.37)$$

*Примітка 1.* Значення опору  $R_{G2}$  — постійне, воно входить у  $d_2$ ; значення опору  $R_{G3}$  — змінне, набуває значення від 0 до 1.

*Примітка 2.* Залежності (1.36) та (1.37) є правильними, якщо виконуються закладені в їх основу припущення:

- потоки повинні бути спрямовані зліва направо (див. рис. 1.7);
- перепади тиску на потокових опорах повинні бути в межах  $P_1 < 2P_2$ ,  $P_2 < 2P_H$ , це так звані некритичні значення.

У випадку, коли перепад тиску на  $R_{G3}$  стає критичним,  $G_3$  визначається так:

$$G_3 = d_3 R_{G3} P_2 / 2. \quad (1.38)$$

### 3. Рівняння стану.

Підставивши (1.36) та (1.37) або (1.38) разом з необхідними константами з табл.1.1 в рівняння (1.27), (1.32) та (1.33), дістанемо остаточно такі рівняння:

$$\frac{dP_K}{dt} = 0.08P_X + 0.168U_2^2 + 0.008; \quad (1.39)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = 0.25 \left[ 0.7P_X - 0.7P_1 - 0.4\sqrt{(P_1 - P_2)P_2} \right] \quad (1.40)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = 0.33 \left[ 0.4\sqrt{(P_1 - P_2)P_2} - 0.25R_{G3}P_2 \right] \quad (1.41)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = 0.33 \left[ 0.4\sqrt{(P_1 - P_2)P_2} - 0.5R_{G3}\sqrt{(P_2 - P_H)P_H} \right]. \quad (1.42)$$

**Примітка.** Рівняння (1.41) використовується в критичному випадку, коли  $P_2 \geq 2P_1$ ; (1.42) — в некритичному, коли  $P_2 < 2P_1$  та  $P_H < P_2$

Таким чином, рівняння (1.39) — (1.42) являють собою модель і гану з параметрами стану  $x_1 = P_K$ ,  $x_2 = P_1$ ,  $x_3 = P_2$  та параметрами керування  $u_1 = u_2$ ,  $u_2 = R_{G3}$ . В класичній узагальненій формі ця модель має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= F_1(x_1, x_2, x_3, u_1, u_2) \\ \dot{X}_2 &= F_2(x_1, x_2, x_3, u_1, u_2) \\ \dot{X}_3 &= F_3(x_1, x_2, x_3, u_1, u_2) \end{aligned} \quad (1.43)$$

Використовуючи векторні позначення  $X^T = (x_1, x_2, x_3)$ ;  $U^T = (u_1, u_2)$ ;  $F^T = (f_1, f_2, f_3)$ , система (1.43) може бути записана зовсім коротко у вигляді (1.23).

### 4. Рівняння виходу.

Як вихідні застосовуються ті величини, що представляють інтерес для розв'язуваної задачі. Для нашого прикладу це будуть:  $y_1$  — тиск  $P_2$ ;  $y_2$  — потік маси  $G_2$ . Таким чином, рівняннями виходу будуть:

$$Y_1 = p_2; \quad (1.44)$$

$$Y_2 = d_2 \sqrt{(p_1 - p_2)p_2} = 0.4 \sqrt{(p_1 - p_2)p_2} \quad (1.45)$$

Остаточно повна математична модель динаміки установки (безперервна модель стану) включає шість рівнянь: (1.39) — (1.45).

## 1.2. Рішення рівнянь стану, програма RRS

Система рівнянь стану у вигляді (1.23) є системою  $N$  нелінійних звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Для її приблизного розв'язання існує досить багато методів обчислювальної математики, які базуються, зокрема, на тому, що безперервний час  $t$  подається у вигляді ряду дискретних значень  $t = kT$ , де  $T$  — інтервал між двома сусідніми значеннями. Розглянемо алгоритмічну та програмну реалізацію одного з найпоширеніших методів вирішення цієї задачі — методу Рунге-Кутта четвертого порядку [11]. На рис. 1.11 показано ядро алгоритму в припущенні, що вектор  $U$  - const.

- `1`| Початкове значення  $\bar{X}$
- `2`| Обчислення  $\bar{F}(\bar{X}, \bar{U})$
- `3`|  $\bar{K}_1 = T\bar{F}$
- `4`| Обчислення  $\bar{F}(\bar{X} + \bar{K}_1/2, \bar{U})$
- `5`|  $\bar{K}_2 = T\bar{F}$
- `6`| Обчислення  $\bar{F}(\bar{X} + \bar{K}_2/2, \bar{U})$
- `7`|  $\bar{K}_3 = T\bar{F}$
- `8`| Обчислення  $\bar{F}(\bar{X} + \bar{K}_3/3, \bar{U})$
- `9`|  $\bar{K}_4 = T\bar{F}$
- `10`|  $\bar{X} = \bar{X} + (\bar{K}_1 + 2\bar{K}_2 + 2\bar{K}_3 + \bar{K}_4)/6$
- `11`| Вивід  $\bar{X}$

Рис. 1.11. Алгоритм Рунге-Кутта для  $U$  - const

На рисунку замість традиційних блоків використані і взяті в лапки рядки. Риски над літерами означають вектори. Початковому моменту часу  $t_0$  відповідає



початкове значення  $\bar{X}$  вектора стану (рядок '1'). У рядку '10' обчислюється нове значення  $\bar{X}$ , яке належить

моменту часу  $t_0 + T$ . У рядках '2' — '9' обчислюються допоміжні величини від  $\bar{K}_1$  до  $\bar{K}_4$ . Якщо  $U$  був би залежним від часу, рядки змінились би таким чином:

$$\begin{array}{ll} \text{'2': } \bar{F}(\bar{X}, \bar{U}(t)); & \text{'4': } \bar{F}\left(\bar{X} + \bar{K}_1/2, \bar{U}\left(t + \frac{T}{2}\right)\right); \\ \text{'6': } \bar{F}\left(\bar{X} + \bar{K}_2/2, \bar{U}\left(t + \frac{T}{2}\right)\right); & \text{'8': } \bar{F}\left(\bar{X} + \bar{K}_3/2, \bar{U}(t+T)\right); \end{array}$$

додатковий рядок '10A':  $t = t + T$ .

При реалізації алгоритму (рис. 1.11) та наступних алгоритмів буде використана одна досить широко розповсюджена у математичному забезпеченні сучасних персональних ЕОМ система програмування Quick Basic 5.0. Виходячи з рис.1.11 виявляється, що універсально примі ними є рядки '1', '3', '5', '7', '9', '10', '11'. Вони не залежать від конкретних задач і реалізовані у програмі RRS (додаток) у головному модулі, У рядках '2', '4', '6', '8', навпаки, знаходяться функції  $\bar{F}$ , які є проблемно-залежними і мусять програмуватися кожного разу при користуванні програмою. У програмі RRS вони розміщуються у підпрограмі розрахунку правих частин РСН. Вектори  $\bar{X}$  та  $\bar{F}$  мають розмірність  $n$ : масиви  $X(n)$ ,  $F(n)$ . Вектори  $\bar{K}_1$  —  $\bar{K}_4$  розміщені в одному масиві  $K(4,n)$ . Вектор  $\bar{U}$  має розмірність  $r$ , а вектор  $T$  —  $m$ . Точні значення цих розмірностей, а також завдання початкових умов, інтервалу квантування часу, завдання значень керуючих діянь та Індексу конкретної вихідної величини, зміну якої за часом можна спостерігати у процесі рішення на дисплеї, встановлюються в діалозі з споживачем (налагодження програми).

Підпрограма розрахунку вихідних параметрів (WP) є другою проблемно-залежною складовою програми RRS, яка програмується споживачем. Однак через те, що ці параметри розраховуються на основі параметрів стану за допомогою простих алгебраїчних залежностей, ніяких складностей тут не виникає.

При виводі результатів після кожних 25 значень є можливість, також у діалозі або продовжити вивід наступних значень (можливо із зміненим кроком по часу), або закінчити розрахунки.

Розглянемо тепер дії споживача і здобуті за допомогою програми HMS результати для наведених у п. 1.1 прикладів.

### 1. Ємкість з двома входами.

Параметри стану:  $x_1$  — маса речовини А в суміші;  $x_2$  — маса речовини В у суміші;  $x_3$  — значення рівня в ємкості;  $x_4$  — температура суміші. Керування:  $u_1$  — об'ємна швидкість вхідного потоку речовини  $u_2$  — об'ємна швидкість вхідного потоку речовини В. Параметри

виходу:  $y_1$ - значення рівня в ємкості;  $y_2$  – щільність суміші, що витікає з ємкості.

До того як перейти до остаточного варіанта рівнянь стану і виходу та відповідних програм РСН та WP, обираємо такі вихідні дані: площа поперечного перерізу ємкості  $S=1 \text{ м}^2$ ; площа вихідного отвору  $S_{\text{отв}}=1 \text{ м}^2$ ; речовина А (гліцерин):  $\rho_{10}=1400$ ,  $T_{10}=50$ ,  $c_{10}=4,5$ ; речовина В (етиленгліколь);  $\rho_{10}=1100$ ,  $T_{10}=70$ ,  $c_{10}=4,8$ ; коефіцієнт теплопередачі  $k = 15$ .

З виразу для об'ємної швидкості  $u = m S_{\text{отв}} \sqrt{2gh}$ , де  $h$  – значення рівня,  $g$  – прискорення вільного падіння. При  $\mu = 0,82$  [12] маємо:

$$u = 0,036\sqrt{h}$$

Залежність щільностей від температури обираємо у вигляді:

$$r_1(x_4) = 1430 - 1,9x_4$$

$$r_2(x_4) = 1130 - 1,9x_4$$

Рівнянн стану для  $x_3$  одержимо з аналізу зміни об'єму

$$\frac{dV}{dt} = S \frac{dh}{dt} = u_{10} + u_{20} - u, \text{ звідки при } S=1 \quad \frac{dh}{dt} = x_3 = u_{10} + u_{20} - 0,036\sqrt{x_3}.$$

Таким чином, для того, щоб скористатися програмою RRS, треба підготувати для цього прикладу такі підпрограми:

```
SUB PCH (X(),U(),F())
R=X(1)*(1430-1,9*X(4))/(X(1)+X(2))+X(2)*(1130-1,9*X(4))
F(1)=1100*U(1)-0,36*X(1)*SQR(X(3))/(X(1)+X(2))*R
F(2)=1400*U(2)-0,36*X(2)*SQR(X(3))/(X(1)+X(2))*R
F(3)=U(1)+U(2)-0,368*SQR(X(3))
F(4)=(F(4)+15*(20-X(4)))/(X(1)+X(2))
END SUB

SUB WP (TP, Q0, Y0)
Y(1)=Q(3)
Y(2)=Q(1)*(1430-1,9*Q(4))/(Q(1)+Q(2))
Y(2)=(Y(2)+Q(2)*(1130-1,9*Q(4)))/(Q(1)+Q(2))
IF TP=0 THEN
PRINT ""
PRINT "t Y(1) Y(2) "
PRINT USING "#####.###"; TP;Y(1); Y(2)
ELSE

PRINT USING "#####.###"; TP;Y(1); Y(2)
END IF
END SUB
```

**Примітка.** В програмі WP параметри стану зберігаються в масиві Q, а виходу – в масиві Y.

Результати роботи програми показані на рис. 1.12 і відображують зміну вихідних параметрів – рівня та щільності суміші за часом для різних початкових умов та значень керувань (I-керування:  $u_1=0,015$ ,  $u_2=0,005$ , II-керування:  $u_1=0,013$ ,  $u_2=0,012$ . Початкові умови: а)  $x_1=0,1$ ,  $x_2=0,1$ ,  $x_3=0,01$ ,  $x_4=20$ ; б)  $x_1=100$ ,  $x_2=100$ ,  $x_3=0,1$ ,  $x_4=50$ ; в)  $x_1=300$ ,  $x_2=300$ ,  $x_3=0,5$ ,  $x_4=60$ .

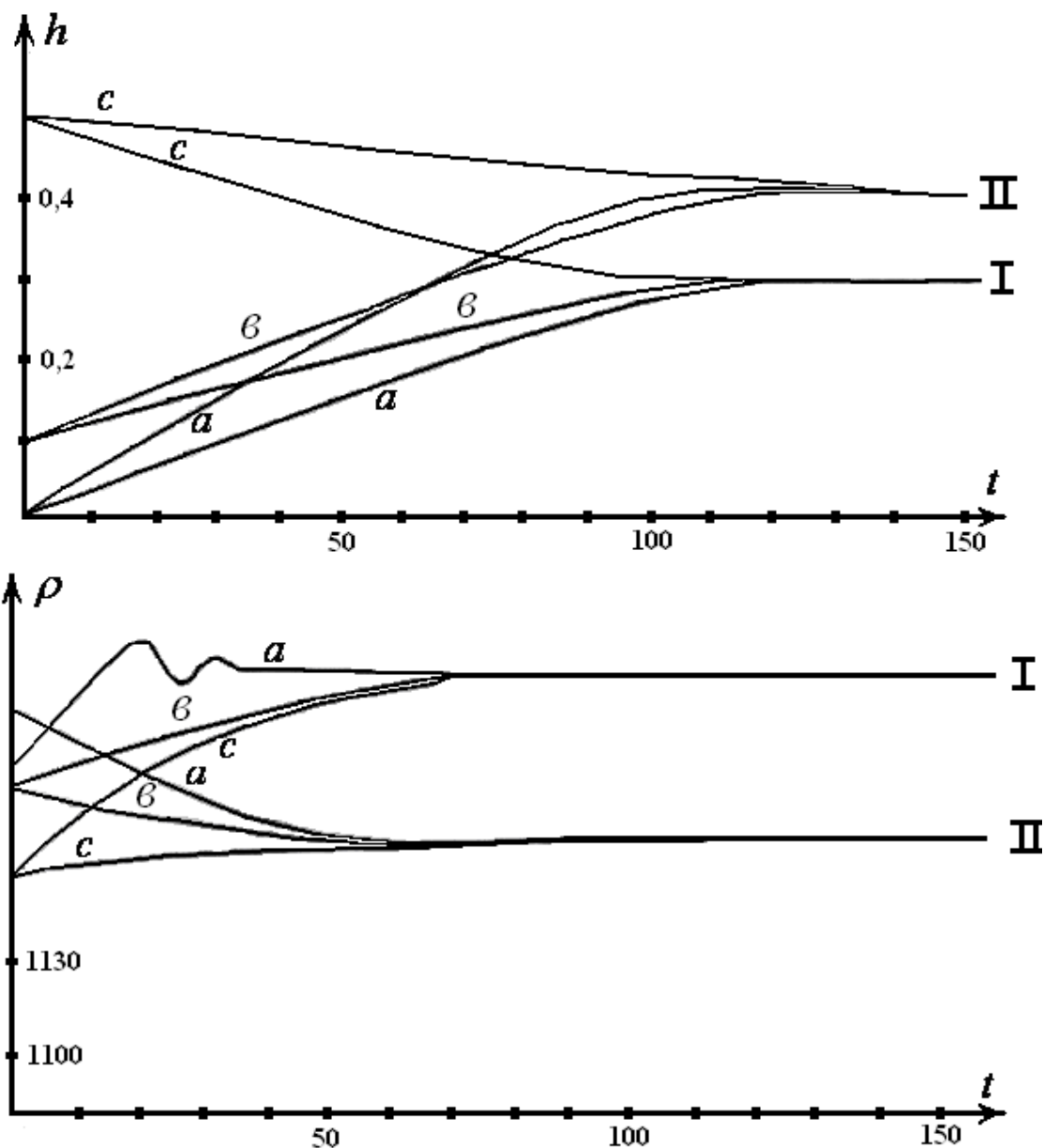


Рис.1.12. Залежність рівня ( $h$ ) та щільності ( $\rho$ ) від часу за різних початкових умов та керувань

## 2. Установка транспортування газового потоку

Параметри стану:  $x_1$  - тиск  $P_k$ ;  $x_2$  - тиск  $P_1$ ;  $x_3$  -  $P_2$ ;

Керування:  $u_1$  - напруга  $u_2$ , що подається на електричний двигун;  $u_2$  - регульований опір  $R_{G3}$ . Параметри виходу:  $y_1$  - тиск  $P_2$ ;  $y_2$  - потік маси  $G_2$ . Підпрограми РСН та WP для цього прикладу наведені в додатку разом з програмою RRS. На рис. 1.13 зображено зміну вихідних параметрів  $P_2$  та  $G_2$  за часом для різних початкових умов та значень керувань ( I-керування:  $U_j = 0,8$ ,  $u_2 = 1$ ; II-керування:  $u_j = 0,5$ ,  $u_2 = 0,5$ . Початкові умови: а)  $x_1 = 0,1$ ,  $x_2 = 0,1$ ,  $x_3 = 0,1$ ; б)  $X_j = 0,5$ ,  $x_2 = 0,5$ ,  $x_3 = 0,5$ ; в)  $X_j = 1,5$ ,  $x_2 = 1,5$ ,  $x_3 = 1,5$ ).

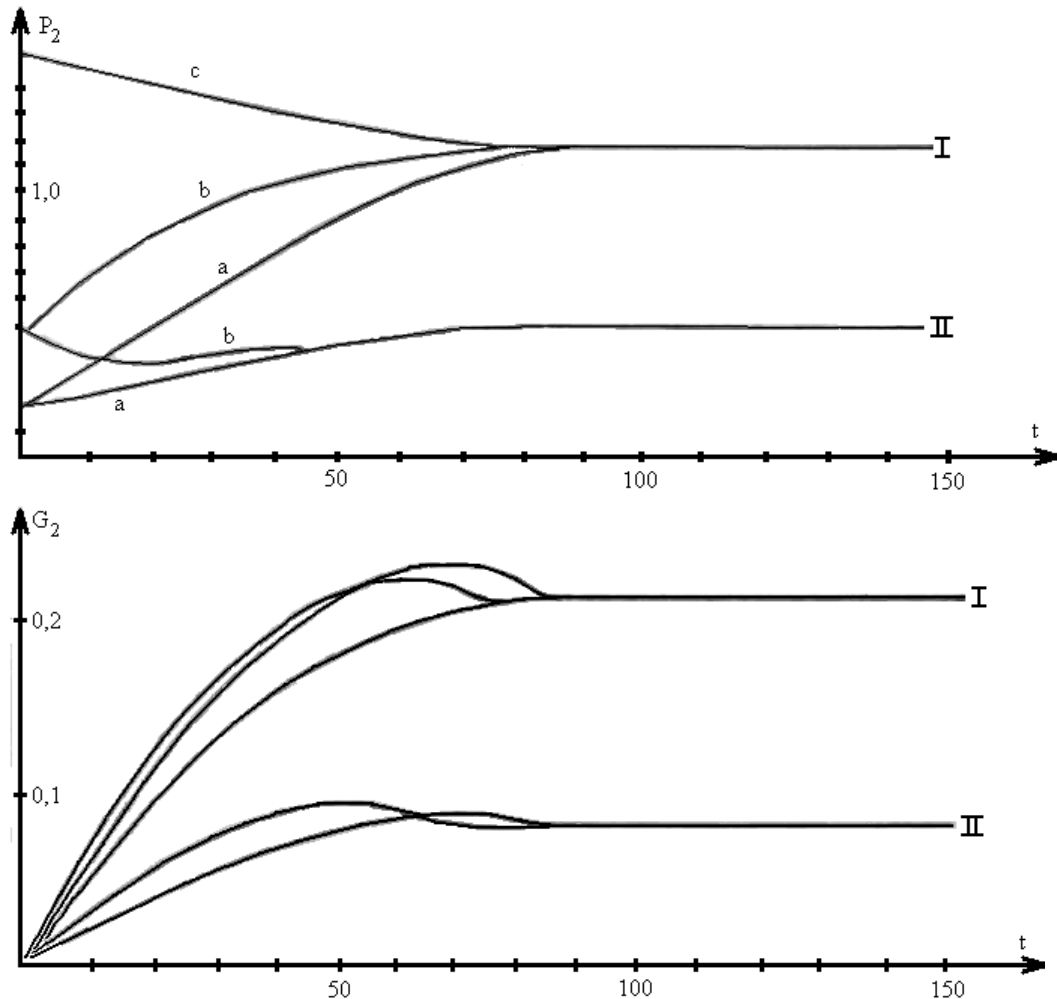


Рис. 1.13. Залежність тиску ( $P_2$ ) та видатку ( $G_2$ ) від часу за різних початкових умов та керувань

### 1.3. Визначення стаціонарної робочої точки, програма RRT

Для визначення стаціонарного режиму динамічної системи, за чийм всі змінні залишаються стабільними, треба, щоб ліві частини і'піїянь стану дорівнювали нулю. Це призводить до системи, найчастіше нелінійних, алгебраїчних рівнянь з кількома невідомими, рішення (корені) такої системи дають координати шуканої робочої точки. В основу алгоритму рішення покладено відомий ньютонівський метод послідовних наближень, або метод дотичних [11] (рис. 1.14).

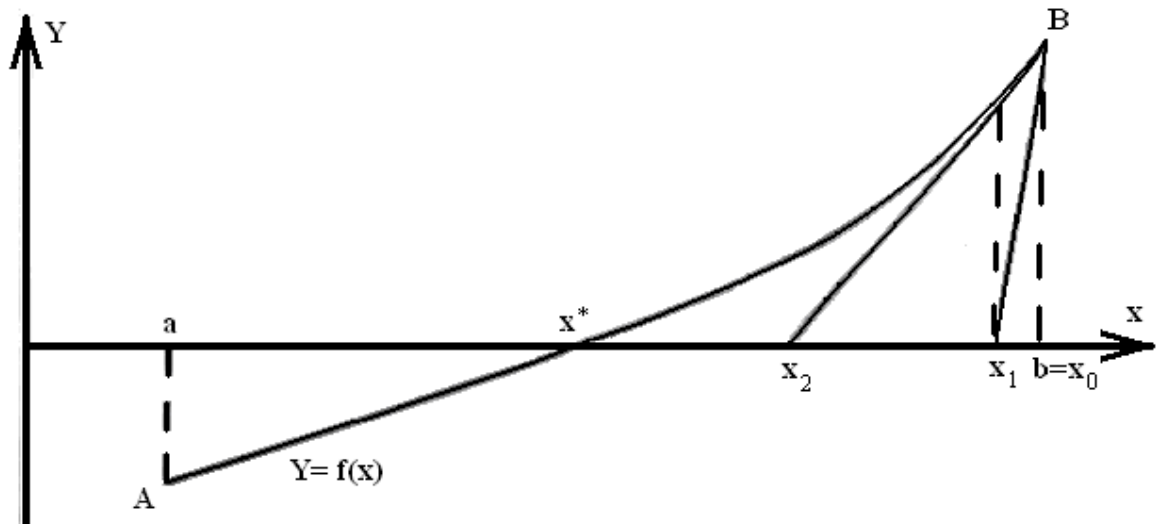


Рис. 1.14. Метод дотичних для однієї змінної

Шуканим є значення  $x^*$  — корінь нелінійного рівняння  $f(x) = 0$ . Починаючи з нульового наближення  $x_0$ , можна організувати ітераційний процес:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 - [f'(x_0)]^{-1} f(x_0); \\ x_2 &= x_1 - [f'(x_1)]^{-1} f(x_1); \\ &\dots \\ x_k &= x_{k-1} - [f'(x_{k-1})]^{-1} f(x_{k-1}); \\ &\dots \end{aligned} \tag{1.46}$$

Цей метод може бути розповсюджений на  $n$  рівнянь з  $n$  невідомими. При цьому в (1.46) будуть введені такі зміни:

- 1) на місці скалярних величин  $x$  ставиться вектор  $X$  з  $n$  невідомими складовими;
- 2) на місці скалярних функцій  $f$  ставиться вектор-функція  $F$ , охоплює також  $n$  складових (рівнянь);

3) на місці єдиної похідної  $V$  з'являється  $\eta$  похідних: кожна з функцій продиференційована по кожній з  $\pi$  змінних. Звичайно, це будуть частинні похідні, вони мають бути зібрані в єдину матрицю  $Y$ ;

4) на місці операції звичайного множення в (1.46) повинна тепер знаходитись операція множення на інвертовану матрицю  $Y^{-1}$ .

Таким чином, остаточно (1.46) набуває вигляду:

$$\begin{aligned}\bar{X}_1 &= \bar{X}_0 - Y^{-1}(\bar{X}_0)f(\bar{X}_0); \\ \bar{X}_2 &= \bar{X}_1 - Y^{-1}(\bar{X}_1)f(\bar{X}_1); \\ &\dots\end{aligned}\tag{1.47}$$

На основі (1.47) може бути побудований такий алгоритм (рис. 1.15):

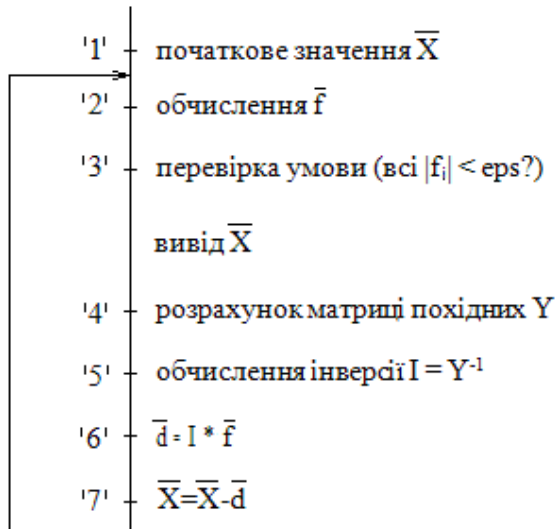


Рис. 1.15. Алгоритм методу Ньютона для розв'язання системи нелінійних рівнянь

Умова в рядку '3' реалізується у такому вигляді:

$$\sum_i |f_i| \leq \epsilon \quad \text{для всіх} \quad i = \overline{1, N}.$$

Її виконання використовується як умова існування рішення та закінчення ітераційного процесу.

У програмі RRT виділимо головний модуль та дві підпрограми інвертування матриці INV і розрахунку правих частин РСН.



У головному модулі:

1) обчислюються частинні похідні — елементи матриці  $Y$  (рядок '4'). Її елемент  $Y(j,p)$  є похідною функції  $f(j)$  за змінною  $x(p)$ :

$$Y(j, p) = \frac{\partial f(j)}{\partial x(p)}; \quad j, p = \overline{1, N}. \quad (1.48)$$

Саме обчислення похідної проводиться на кінцево-різницевій основі за формулою:

$$Y(j, p) \approx \frac{f^+(j) - f^-(j)}{2d}; \quad (1.49)$$

де  $f^+(j)$  та  $f^-(j)$  — значення функції, знайдені відповідно при  $x(p) = x(p) + \delta$  та  $x(p) = x(p) - \delta$ ;  $\delta$  — відхилення, значення якого задається споживачем;

2) формується звернення до підпрограми інвертування матриці  $INV$ , розрахунок за результатами вектора  $Z$  (рядки '5', '6');

3) обчислюється нове значення вектора  $X$  (рядок '7');

4) виконується перевірка умови

$$\sum_i |f_i| \leq eps \quad \text{для всіх} \quad i = \overline{1, N}$$

(рядок '3') і за її результатом приймається рішення про закінчення обчислень;

5) вивід результатів роботи програми у вигляді значень координат робочої точки.

Підпрограма  $INV$  виконує стандартну процедуру інвертування матриці (рядок '5') з перевіркою умови  $Y(1,1) \neq 0$ . При виконанні цієї умови матриця не є такою, що може бути інвертована. В цьому випадку обчислення перериваються, стає потрібним новий цикл розрахунків з іншими початковими наближеннями.

Підпрограма обчислення правих частин РСН містить у собі, крім правих частин рівнянь стану, ще рівняння виходу, в лівій частині яких знаходяться бажані значення вихідних параметрів. Як і при вирішенні рівнянь стану (див. п.1.1), цю підпрограму треба підготувати самому споживачеві. Особливістю підготовки підпрограми є те, що керуванням надаються імена старших елементів масиву  $X$ . Наприклад, якщо  $t = 6$ , то при чотирьох параметрах стану і двох керуваннях, керування будуть мати імена  $X(5)$ ,  $X(6)$ .

Налагодження програми забезпечує ввід в діалоговому режимі іначень розмірності  $n$ , відхилення  $DEL$  і початкових наближень стану та керувань  $X(1), \dots, X(n)$ . Звичайно, ці наближення повинні лежати поблизу очікуваних значень рішення, що найчастіше буває відомо з технологічних міркувань.

Розглянемо застосування програми RRT для прикладів 1 та 2 .

### 1. Ємкість з двома входами.

Підпрограма розрахунку правих частин РСН для значень вихідних параметрів  $Y_1 = 0,3$ ,  $y_2 = 1250$  має вигляд:

```
SUB pch (X(). f())
R - X(1) · (1430 — 1.9 · X(3)) / (X(1) + X(2)) + X(2) * (1130 — 1.9 * X (3))
XX = (X(1) + X(2)) / R
f(1) = X(4) · 1100 — .036 · SQR(XX) * X(1) / (X(1) + X(2)) * R
f(2) = X(5) · 1400 — .036 * SQR(XX) * X(2) / (X(1) + X(2)) * R
f(3) = (X(4) * 1100 * (50 — X(3)) + X(5) * 1400 · (70 — X(3)) + 15 * (20
f(4) = 1250-R
f(5) = .3 — XX
END SUB
```

Результати розрахунків за програмою RRT координат трьох робочих точок наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Координати робочих точок для прикладу 1

Параметри	Початкові умови		
$x_1$	100	200	300
$x_2$	100	200	300
$x_3$	55	40	50
$x_4$	0,015	0,010	0,005
$x_5$	0,005	0,010	0,015
$y_1$	0,5	0,3	0,7
$y_2$	1300	1150	1350
	Координати робочої точки		
$x_1$	544,82	123,07	943,96
$x_2$	105,18	221,93	1,040
$x_3$	42,870	45,80	41,93
$u_1$	0,0252	0,0073	0,037
$u_2$	0,0038	0,0104	0,00003

### 2. Установка транспортування газового потоку.

Підпрограма розрахунку правих частин РСН для значення вихідного параметра  $y_1 = 0,2$  наведена у додатку разом з програмою RRT. Результати розрахунку координат робочих точок наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Координати робочих точок для прикладу 2

Параметри	Початкові умови		
$x_1$	2	1,2	0,3
$x_2$	1,5	1,1	0,2
$x_3$	1	1	0,1
$x_4$	1	0,8	0,8
$y_1$	0,2	0,35	0,5
Координати робочої точки			
$x_1$	1,398	2,447	3,495
$x_2$	1,112	1,947	2,781
$x_3$	0,8	1,4	2
$u_1$	0,786	1,057	1,272
$u_2$	1	1	1

#### 1.4. Лінеаризація моделі стану, програма LMS

Багато досліджень динаміки хіміко-технологічних процесів ґрунтуються на лінійних моделях. Для цього, як вже згадувалось в п.1.1. нелінійні функції  $F_i$   $G_i$  замінюються на лінійні в околі робочої точки, координати якої відповідають конкретному технологічному режиму. Найчастіше, це стаціонарна точка знайдена за допомогою програми RRT. Лінеаризована форма рівнянь стану у припущенні відсутності  $Z$  матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + \dots + b_{1r}u_r; \\ \frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + \dots + b_{2r}u_r; \\ \dots \\ \frac{dx_n}{dt} = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + \dots + b_{nr}u_r; \end{cases} \quad (1.50)$$

а рівнянь виходу відповідно:

$$\begin{cases} y_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + \dots + d_{1r}u_r; \\ y_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2n}x_n + d_{21}u_1 + \dots + d_{2r}u_r; \\ \dots \\ y_m = c_{m1}x_1 + c_{m2}x_2 + \dots + c_{mn}x_n + d_{m1}u_1 + \dots + d_{mr}u_r; \end{cases} \quad (1.51)$$

Якщо коефіцієнти  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $d_{ij}$  з (1.50) та (1.51) поєднати в матриці  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , то можна записати коротко:

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{X}}{dt} &= A\bar{X} + B\bar{U}; \\ \bar{Y} &= C\bar{X} + D\bar{U}.\end{aligned}\tag{1.52}$$

Зміни  $X$ ,  $U$ ,  $Y$  (1.50),(1.51) є, таким чином, відхиленнями від робочої точки.

Якщо перейти безпосередньо до програми лінеаризації LMS, то матриці будуть представлені масивами  $A(n,n)$ ,  $B(n,r)$ ,  $C(m,n)$ ,  $D(m,r)$ . Самі елементи цих масивів — коефіцієнти лінеаризованих рівнянь (1.52) обчислюються за формулами

$$A(i, j) = \frac{\partial F(i)}{\partial X(j)}; i, j = 1, \dots, n;\tag{1.53}$$

$$B(i, j) = \frac{\partial F(i)}{\partial U(j)}; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, r;\tag{1.54}$$

$$C(i, j) = \frac{\partial G(i)}{\partial X(j)}; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n;\tag{1.55}$$

$$D(i, j) = \frac{\partial G(i)}{\partial U(j)}; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, r\tag{1.56}$$

Обчислення частинних похідних повністю відповідає (1.49), тобто вони обчислюються чисельно.

Структурно програма LMS, як і попередні програми, складається з головного модуля та підпрограми РСН правих частин рівнянь стану і рівнянь виходу. У головному модулі змінні стану  $X$  та керування  $U$  поєднані в одному масиві  $V(n + m)$ : перші  $n$  елементів цього масиву є параметрами стану, останні  $m$  — керування. Таким самим чином, масив  $F(n + r)$  містить коефіцієнти функцій  $F$  і  $G$ . У головному модулі виконується послідовно обчислення частинних похідних у кількості  $(n + r) * (n + m)$  та занесення результатів в масиви  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . У процесі обчислень виконуються багаторазові звернення до підпрограми РСН, де містяться підготовлені споживачем функції — праві частини рівнянь стану та рівнянь виходу. При налагодженні програми в діалоговому режимі вводиться відхилення  $DEL$  та координати робочої точки у кількості  $n+m$ . Вивід результатів роботи програми виконується головним модулем у вигляді матриць стану  $A$ , керування  $B$ , спостереження  $C$ , транзиту  $D$ .

В табл.1.4 та 1.5 містяться результати застосування програми LMS для прикладів 1 та 2.

Таблиця 1.4

## Результати застосування програми LMS для прикладу 1

Координати робочої точки	Матриці лінеаризованої моделі стану					
$x_1 = 544.82$ $x_2 = 105.18$ $x_3 = 0.5$ $x_4 = 12.87$ $u_1 = .0252$ $u_2 = .38E-2$	Матриця стану А				Матриця керування В	
	-.99E-2	.0508	-27.739	.0405	1100	0
	.79E-2	-.041	-5.355	.78E-2	0	1400
	0	0	-.0254	0	1	1
	2.5E-6	2.5E-6	0	-1.898	12.07	58.43
	Матриця спостереження С				Матриця транзиту D	
	0	0	1	0	0	0
	.079	-.0384	0	-1.898	0	0
$x_1 = 123.07$ $x_2 = 221.93$ $x_3 = 0.3$ $x_4 = 45.80$ $u_1 = .73E-2$ $u_2 = .0104$	Матриця стану А				Матриця керування В	
	-.046	.0256	-13.483	.0133	1100	0
	.035	-.0195	-24.314	.0241	0	1400
	0	0	-.0328	0	1	1
	7.74E-6	7.75E-6	0	-.108	13.39	98.20
	Матриця спостереження С				Матриця транзиту D	
	0	0	1	0	0	0
	.555	.311	0	-1.898	0	0
$x_1 = 943.96$ $x_2 = 1.040$ $x_3 = 0.7$ $x_4 = 41.93$ $u_1 = .037$ $u_2 = 0.3E-4$	Матриця стану А				Матриця керування В	
	-4.76E-5	.0525	-29.012	.057	1100	0
	4.73E-5	-.043	-.032	6.29E-5	0	1400
	0	0	-.0215	0	1	1
					9.393	41.58
	Матриця спостереження С				Матриця транзиту D	
	0	0	1	0	0	0
	0	-.317	0	-1.898	0	0

**1.5. Модель замкненого контуру керування, програма RSK**

На основі розглянутих заходів з моделювання хіміко-технологічних процесів у просторі станів, визначення координат робочої точки, лінеаризації моделі і здійснення таким чином переходу до найбільш зручної та простої моделі (1.52) можна поставити наступну задачу. Для класичного замкненого контура керування (рис. 1.16): а) скласти моделі стану для технологічного процесу та для керуючого пристрою; б) скласти модель стану замкненого контуру також у формі (1.52).

Таблиця 1.5

Результати застосування програми LMS для прикладу 2

Координати робочої точки	Матриці лінеаризованої моделі стану			
$x_1 = 1.3982$ $x_2 = 1.1125$ $x_3 = 0.8$ $u_1 = 7865$ $u_2 = 1$	Матриця стану А			Матриця керування В
	-.080	0	0	.0264
	.175	-.255	.049	0
	0	.107	-.148	0
	Матриця спостереження С			Матриця транзиту D
	0	.999	0	0
	0	.320	-.195	0
$x_1 = 2.4468$ $x_2 = 1.9468$ $x_3 = 1.4$ $u_1 = 1.0571$ $u_2 = 1$	Матриця стану А			Матриця керування В
	-.080	0	0	.355
	.175	-.255	.049	0
	0	.107	-.148	0
	Матриця спостереження С			Матриця транзиту D
	0	.999	0	0
	0	.320	-.195	0
$x_1 = 3.4955$ $x_2 = 2.7812$ $x_3 = 2$ $u_1 = 1.2720$ $u_2 = 1$	Матриця стану А			Матриця керування В
	-.080	0	0	.427
	.175	-.255	.049	0
	0	.107	-.148	0
	Матриця спостереження С			Матриця транзиту D
	0	.999	0	0
	0	.320	-.195	0

Очевидно, що такий підхід може бути розглянутий як найпростіший варіант формалізації процедур аналізу та синтезу системи керування.

Розглянемо модель стану технологічного процесу. Технологічний процес характеризується п змінними стану (вектор  $X$ ), однією вихідною величиною ( $y$ ) та двома вхідними величинами ( $u$ -керування та  $z$ -збурення). У загальному випадку при лінійній формі моделі стану матриця керування В може бути розбита на дві частини:  $\bar{b}_u$  та  $\bar{b}_z$ , через які впливають на зміну стану обидві вхідні величини:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + \bar{b}_u u + \bar{b}_z z. \quad (1.57)$$

Тут  $A$  —  $(n \times n)$  квадратна матриця;  $\bar{b}_u$ ,  $\bar{b}_z$  — вектор-стовпці;  $u$ ,  $z$  — скаляри.



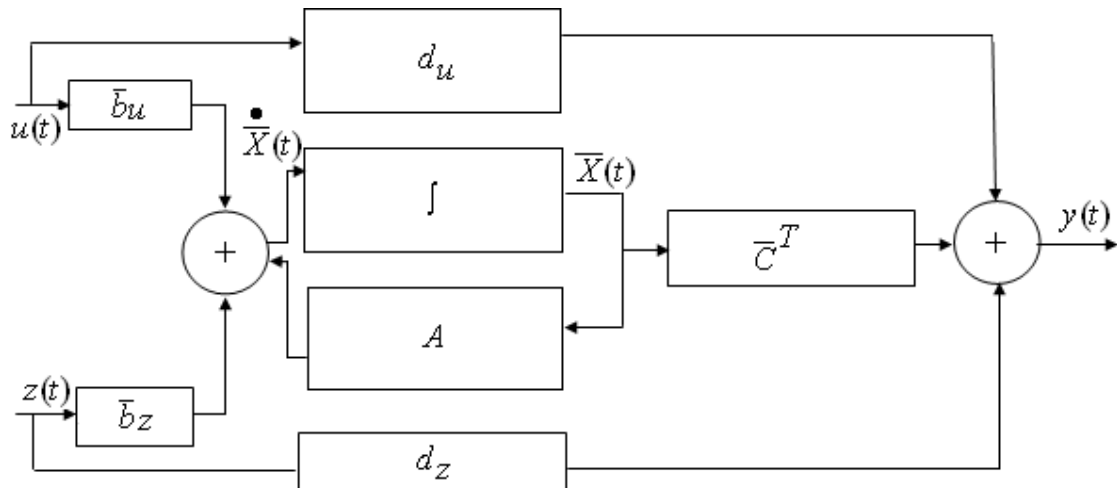
Рис.1.16. Схема замкнутого контура керування

**Примітки.** Розглядаючи (1.57) та наступні рівняння, стежте за результатами перетворень матричної алгебри.

Для єдиного рівняння виходу треба також в матриці спостережень виділити вектор-рядок  $c^{-T}$ , а в матриці транзиту D виділити два коефіцієнти  $d_u$  та  $d_z$ . Тоді рівняння виходу дістанемо у вигляді:

$$y = c^{-T} X + d_u u + d_z z \quad (1.58)$$

Процедура розв'язання рівнянь (1.57) та (1.58) за реальним часом може бути пояснена структурною (рис 1.17) Блоки цієї структури можна реалізувати за різних фізичних рівнянь, насамперед на рівні програмному.



1.17 Структурна схема розрахунку моделі технологічного процесу.

Щодо моделі стану керуючого пристрою, то ми зупинимось на загальновідомому алгоритмі ПІД- закону. Тут треба виділити дві ситуації, пов'язані з Д складовою цього закону. Перша, яку назвемо «керування без Д-складової», передбачає що  $d_u$ ,  $d_z$  відрізняються від нуля, тобто контур керування є чутливим по  $u$  або по  $z$  буде сприйнятий як поштовх на вході  $y$ . В цьому випадку Д-складова не використовується, модель стану керуючого пристрою є моделлю з одним параметром стану  $x_b$ . цей параметр характеризує пам'ять пристрою, тобто відноситься тільки до І складової. У відповідності з рисунку 1.16 маємо:

$$\frac{dx_s}{dt} = y - w. \quad (1.59)$$

Рівнянням виходу керуючого пристрою (ПІ-закон) буде:

$$u = k_{\Pi} (w - y) + k_I \int_0^T (w - y) dt. \quad (1.60)$$

Звідси після інтегрування маємо:

$$u = -k_{\Pi} y - k_I x_s + k_{\Pi} w, \quad (1.61)$$

де  $k_{\Pi}, k_I$  - параметри закону;  $(w - y)$  – сигнал похибки.

Виконуємо такі перетворення.

1. Підставимо (1.58) у (1.61), маємо:

$$u = -k_{\Pi} (\bar{c}^T x + d_u u + d_z z) - k_I x_R + k_P w,$$

або, після поєднання членів з керуванням  $u$ :

$$u = -k_{\Pi} c_0 \bar{c}^T x - k_{\Pi} c_0 d_z z - k_I c_0 x_s + k_{\Pi} c_0 w, \quad (1.62)$$

де

$$c_0 = \frac{1}{1 + k_{\Pi} d_u}. \quad (1.63)$$

Таким чином, внаслідок першої підстановки ми дістали вираз для  $u$  з новим співмножником  $c_0$ .

2. Підставимо (1.62) в (1.57). Після групування дістаємо:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = (A - k_{\Pi} c_0 \bar{b}_u \bar{c}^T) x - k_I c_0 \bar{b}_u x_s + k_{\Pi} c_0 \bar{b}_u w + (\bar{b}_z - k_{\Pi} c_0 d_z \bar{b}_u) z. \quad (1.64)$$



3. Підстановка (1.62) в (1.58), а потім (1.58) в (1.59) дає:

$$\frac{dx_S}{dt} = (1 - k_{\Pi} c_0 d_u) \bar{c}^{-T} \bar{x} - k_I c_0 d_u x_S + (k_{\Pi} c_0 d_u - 1)w + (1 - k_{\Pi} c_0 d_u d_z)z. \quad (1.65)$$

4. Підстановка у з (1.62) в (1.58) дає новий варіант рівняння виводу:

$$y = c_0 \bar{c}^{-T} \bar{x} - k_I c_0 d_u x_S + k_{\Pi} c_0 d_u w + c_0 d_z z. \quad (1.66)$$

Вирази (1.65), (1.66) додатково спрощуються з урахуванням того, що з (1.63) випливає:

$$1 - k_{\Pi} c_0 d_u = c_0$$

Остаточно дістаємо для замкненого контура керування два рівняння стану і одне виходу:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (A - k_{\Pi} c_0 \bar{b}_u \bar{c}^{-T}) \bar{x} - k_I c_0 \bar{b}_u x_S + k_{\Pi} c_0 \bar{b}_u w + (\bar{b}_z - k_{\Pi} c_0 d_z \bar{b}_u)z; \\ \frac{dx_S}{dt} = c_0 \bar{c}^{-T} \bar{x} - k_I c_0 d_u x_S - c_0 w + c_0 d_z z; \end{cases} \quad (1.67)$$

$$y = c_0 \bar{c}^{-T} \bar{x} - k_I c_0 d_u x_S + k_{\Pi} c_0 d_u w + c_0 d_z z. \quad (1.68)$$

Таким чином, рівняння (1.67) є рівнянням стану для контура керування з новим вектором стану:

$$\bar{X}^* = \begin{pmatrix} x \\ x_S \end{pmatrix}$$

розмірністю якого є (n+1), а (1.68) є рівнянням виходу. Матриці нової системи – замкненого контуру керування – складаються з (1.67) та (1.68):

$$A^* = \begin{pmatrix} A - k_n^c B_u C^{-T} & -k_i^c \bar{b}_u \\ c_o^c^{-T} & -k_i^c d_u \end{pmatrix} \quad (1.69)$$

$$\bar{b}_w^* = \begin{pmatrix} k_n^c b_u \\ -c_o \end{pmatrix} \quad \bar{b}_z^* = \begin{pmatrix} \bar{b}_z - k_n^c d_z \bar{b}_u \\ c_o \end{pmatrix} \quad (1.70)$$

$$\bar{c}^{*T} = (c_o^c^{-T} \quad -k_i^c C_0 d_u); \quad (1.71)$$

$$d_w^* = 1 - c_0; \quad d_z^* = c_0 d_z. \quad (1.72)$$

Структурну схему розрахунку цієї системи показано на рис. 1.18.

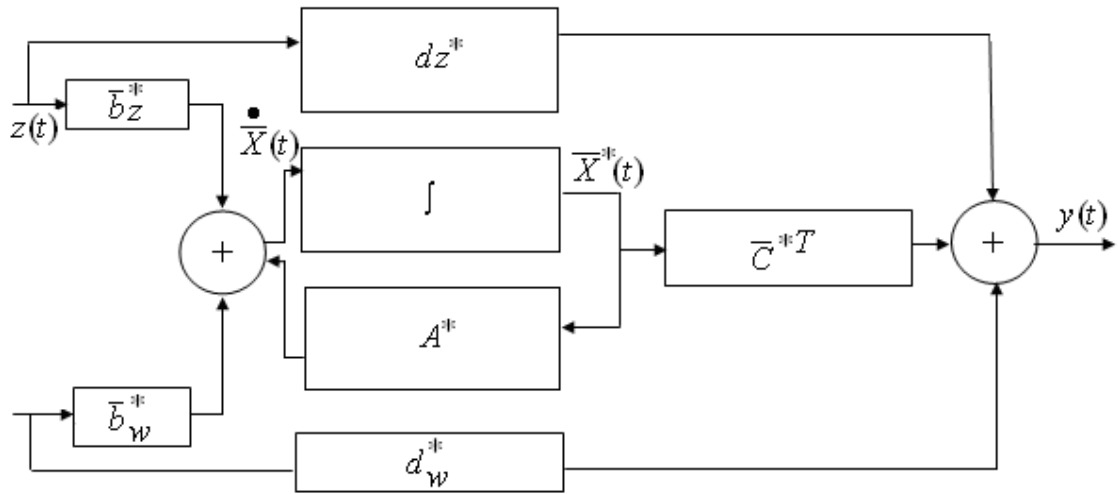


Рис. 1.18. Структурна схема розрахунку замкненого контура керування

**Примітка.** Керування, що здійснюється за класичним ПІ-законом "пішло у середину", тобто зовні залишились дві можливості: нові завдання  $w(t)$  та впливати збуренням  $z(t)$ .

Друга ситуація — це "керування з Д-складовою", коли виконана умова  $d_u = d_z = 0$ . Ніякі керуючі дії та збурення не проходять на вихід миттєво, без відповідної зміни стану. Рівнянням виходу технологічного процесу буде:

$$y = \bar{c}^{-T} \bar{X}, \quad (1.73)$$

а рівняння стану збігається з (1.57).

Щодо рівнянь керуючого пристрою, то його рівняння стану відповідає (1.59). Рівнянням виходу, виходячи з (1.61) і враховуючи Д-складову, буде:

$$\dot{u} = -k_{\Pi} y - k_{IS} x_S - k_L \dot{y} + k_{\Pi} w. \quad (1.74)$$

Примітка. Д-складова закону поширюється тільки на канал пе-імнії величини  $y$ , але не на канал передавання завдання  $w$ . Продеференціювавши (1.73) за часом, одержимо для  $y$ :

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \bar{c}^{-T} \frac{d\bar{X}}{dt}. \quad (1.75)$$

Підставивши (1.75) в (1.74), а потім співвідношення для керування  $u$  а (1.57), матимемо:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = A\bar{X} + \bar{b}_u (-k_{\Pi} \bar{c}^{-T} \bar{X} - k_{IS} x_S - k_D \bar{c}^{-T} \frac{d\bar{X}}{dt}) + k_{\Pi} \bar{b}_u w + \bar{b}_z z. \quad (1.76)$$

Підставивши в лівій частині члени з  $\frac{d\bar{X}}{dt}$ , дістаємо з використанням одиничної матриці  $E$ :

$$(E + k_D \bar{b}_u \bar{c}^{-T}) \frac{d\bar{X}}{dt} = (A - k_{\Pi} \bar{b}_u \bar{c}^{-T}) \bar{X} - k_i \bar{b}_u x_S + k_{\Pi} \bar{b}_u w + \bar{b}_z z, \quad (1.77)$$

а переписавши рівняння стану (1.57) з урахуванням (1.73), дістанемо:

$$\frac{dx_S}{dt} = \bar{c}^{-T} \bar{X} - w. \quad (1.78)$$

Якщо ввести нову матрицю М:

$$M = \begin{pmatrix} E + k_{\Pi} b_u c^{-t} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.79)$$

то можна переписати (1.77) та (1.78) у такій формі:

$$M \begin{pmatrix} \frac{d\bar{X}}{dt} \\ \frac{dX_s}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A - k_{\Pi} b_u c^{-t} & -k_I b_u \\ c^{-t} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \bar{X} \\ X_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_n \bar{b}_u \\ -1 \end{pmatrix} w + \begin{pmatrix} \bar{b}_z \\ 0 \end{pmatrix} z. \quad (1.80)$$

Якщо помножити всі члени (1.80) зліва на  $M^{-1}$ , то дістанемо в лівій частині:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\bar{X}}{dt} \\ \frac{dX_s}{dt} \end{pmatrix} = \frac{d\bar{X}^*}{dt},$$

а в правій — вираз, який за своєю структурою аналогічний (1.67), (1.68), але з іншими матрицями  $A^*$ ,  $b_w^*$  та ін.:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{X}^*}{dt} A^* \bar{X}^* + \bar{b}_w^* w + \bar{b}_z^* z, \\ y = \bar{c}^{-T} \bar{X}^* \end{cases} \quad (1.81)$$

$$\text{де } A^* = M^{-1} \begin{pmatrix} A - k_{\Pi} b_u \bar{c}^{-T} & -k_I \bar{b}_u \\ \bar{c}^{-T} & 0 \end{pmatrix} \quad (1.82)$$

$$\begin{cases} \bar{b}_w^* = M^{-1} \begin{pmatrix} k_{\Pi} \bar{b}_u \\ -1 \end{pmatrix} \\ \bar{c}^{-T*} = (\bar{c}^{-T} \quad 0) \end{cases} \quad \bar{b}_z^* = M^{-1} \begin{pmatrix} \bar{b}_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.83)$$

Щодо структурної схеми розрахунку замкненого контура з Д-складовою, то вона збігається із схемою на рис. 1.18.

Враховуючи те, що описані дві ситуації, пов'язані з Д-складовою, є взаємовиключаючими, можна дістати більш загальні співвідношення для розрахунку матриць:

з (1.68) та (1.81):

$$A^* = M^{-1} \begin{pmatrix} A - c_o k_n \bar{b}_u \bar{c}^{-T} & -c_o k_I \bar{b}_u \\ c_o \bar{c}^{-T} & -c_o k_I d_u \end{pmatrix} \quad (1.84)$$

з (1.70) та (1.83):

$$b_w^* = M^{-1} \begin{pmatrix} c_o k_n \bar{b}_u \\ -c_o \end{pmatrix} \quad b_z^* = M^{-1} \begin{pmatrix} \bar{b}_z - c_o k_n d_z \bar{b}_u \\ c_o d_z \end{pmatrix} \quad (1.85)$$

з (1.71) та (1.83):

$$\bar{c}^{-T*} = (c_o \bar{c}^{-T} - c_o k_I d_u); \quad (1.86)$$

з (1.72):

$$d_w^* = 1 - c_o; \quad d_z^* = c_o d_z. \quad (1.87)$$

При цьому можуть бути два варіанти:

- 1)  $d_u, d_z \neq 0; \quad k_D = 0; \quad M = E;$
- 2)  $d_u = d_z = 0; \quad k_D = 0; \quad c_o = 1.$

Програма RSK як вхідні використовує матриці моделі технологічного процесу у просторі станів, яка лінеаризована в околиці робочої точки, а також дані про закон керування ( $k_n, k, k_d$ ). Як і завжди ці дані вводяться у діалоговому режимі налагодження програми. Головна програма виконує обчислення та вивід матриць  $A^*$  масив  $A(n+1, n+1)$ , матриць  $B^*$  -  $(b_w^*, b_z^*)$  — масив  $B(n+1, 2)$ , вектор-рядка  $C^*$  масив  $C(n+1)$ , коефіцієнтів  $d^{*T} = (d_w^*, d_z^*)$  — масив  $D(2)$ .

Якщо програма RSK використовується для розрахунку замкнутого контура із законом керування без І-складової, то останній стовпець матриці А складається тільки з нульових елементів. Щодо використання Д-складової, то це можливо лише тоді, коли матриця транзиту дорівнює нулю. Підпрограма інвертування матриць INV аналогічна тій, що використовується в програмі RRT.

Результати застосування програми RSK для двох прикладів наведені в табл.1.6. Дані про конкретні значення параметрів закону керування ( $k_n$  - 7,  $K_j$  - 0,75) взяті з відомих інженерних методик їх визначення [13,15]. Як вхідні використані матриці лінеаризованих моделей стану (див. табл. 1.4 та табл. 1.5, координати перших робочих точок).

Таблиця 1.6

### Матриці замкнутого контура керування

#### Приклад 1.

$$A^* = \begin{pmatrix} -608.31 & 2956.85 & -27.74 & 14614.64 & -825.12 \\ .0079 & -.0411 & -5.355 & .0078 & 0 \\ -.553 & 2.688 & -.0254 & 13.286 & -.75 \\ -6.675 & 32.444 & 0 & 160.288 & -9.053 \\ .079 & -3.85 & 0 & -1.898 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B^* = \begin{pmatrix} 7700 & 0 \\ 0 & 1400 \\ 7 & 1 \\ 84.49 & 58.43 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad c^{*T} = (.079 \quad -.384 \quad 0 \quad -1.898 \quad 0).$$

#### Приклад 2.

$$A^* = \begin{pmatrix} .08 & -.592 & .360 & -.198 \\ .175 & -.255 & .049 & 0 \\ 0 & .107 & -.148 & 0 \\ 0 & .321 & -.195 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B^* = \begin{pmatrix} 1.848 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -.067 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad c^{*T} = (0 \quad .32 \quad -.195 \quad 0).$$

## Глава 2. Безперервні моделі "вхід-вихід"

У загальному вигляді при одній вхідній величині  $u$  і одній вихідній у технологічний процес може виявити п внутрішніх величин стану  $X_1, \dots, X_n$ . Зовні на входах та виходах процесу величини стану не враховуються. Модель, що зв'язує тільки  $u$  та  $y$  і не містить в собі, звичайно, ніяких величин стану, зветься моделлю у формі "вхід-вихід". Якщо процес має  $g$  вхідних та  $m$  вихідних величин, то можна відрізнити  $gm$  моделей "вхід-вихід", що описують зв'язок кожного входу з кожним виходом.

Якщо розглядати тільки лінійні або лінеаризовані моделі процесів, то математично вони уявляються або за допомогою звичайних диференціальних рівнянь, або у формі передавальних функцій. У першому випадку зв'язок між одним вхідним діянням та одним виходом має вигляд:

$$\begin{aligned} a_0 y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + a_{n-1} y^{(1)}(t) + a_n y(t) = \\ = b_0 u^{(m)}(t) + b_1 u^{(m-1)}(t) + \dots + b_{m-1} u^{(1)}(t) + b_m u(t). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Диференціальне рівняння (2.1) є лінійним з постійними коефіцієнтами. Додатковою особливістю є те, що з умов фізичної реалізації співвідношення між порядками старшої похідної лівої і правої частин має вигляд  $n \geq m$ . Переконайтеся у справедливості цієї особливості можна таким чином. Нехай  $m = 0$ ,  $n = 1$ , тоді рівняння буде:

$$a_0 y^{(1)}(t) + a_1 y(t) = b_0 u(t).$$

Очевидно, що в цьому випадку все гаразд: на виході як результат вхідного діяння з'явилось саме значення  $y(t)$  та похідна від нього. Якщо, навпаки,  $n = 1$ ,  $m = 0$ , то маємо:

$$a_0 y(t) = b_0 u^{(1)}(t) + b_1 u(t).$$

В цьому випадку вихідний сигнал  $y(t)$  повинен реагувати не тільки на вхідний  $u(t)$ , а ще й на сигнал  $u^{(1)}(t)$ , якого ще нема.

У другому випадку зв'язок між  $u$  та  $y$  зображується у вигляді передавальної функції, що за визначенням [14] являє собою підношення перетворення Лапласа вихідної координати лінійної системи до перетворення вхідної координати за нульових початкових умов. Передавальна функція є дробово-раціональною функцією параметра перетворення Лапласа  $p$ :

$$W(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n} \quad (2.2)$$

Існує дуже просте правило здобуття передавальної функції з диференціального рівняння:

1. Похідні в лівій і правій частинах (2.1) замінюються на  $p$  в степені, що дорівнює порядку замінюваної похідної.

2. Здобутий таким чином поліном правої частини є чисельником передавальної функції, а поліном лівої частини - її знаменником.

Дуже важливим є також питання про переходи від моделі стану до передавальної функції  $W(p)$ .

### 2.1. Зв'язок між моделлю стану і моделлю "вхід-вихід", програма SWW

Розглянемо лінійну модель стану без збурень а урахуванням того, що на вході діє одна величина  $u$ , а на виході - одна величина  $y$ .

$$\frac{dX}{dt} = A\bar{X} + \bar{b}u; \quad (2.3)$$

$$y = \bar{c}^T \bar{X} + du, \quad (2.4)$$

де  $A$  — квадратна матриця;  $\bar{b}$  — вектор-стовпець;  $\bar{c}$  — вектор-рядок;  $u, u, d$  — скаляри.

Перетворення Лапласа цих двох рівнянь за нульових початкових умов дає:

$$pX(p) = AX(p) + bu(p); \quad (2.5)$$

$$y(p) = \bar{c}^T X(p) + du(p). \quad (2.6)$$

З (2.5) маємо з використанням одиничної матриці  $E$

$$pX(p) - AX(p) = (pE - A)X(p) = bu(p)$$

і, таким чином,

$$X(p) = (pE - A)^{-1} \bar{b}u(p). \quad (2.7)$$

Підстановка (2.7) в (2.6) дає:

$$y(p) = \bar{c}^T (pE - A)^{-1} \bar{b}u(p) + du(p) = u(p) \left[ \bar{c}^T (pE - A)^{-1} \bar{b} + d \right]. \quad (2.8)$$

Безпосередньо з (2.8) за визначенням передавальної функції дістаємо результат:



$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = c^{-T} (pE - A)^{-1} b + d \quad (2.9)$$

Таким чином, рівняння (2.9) є шуканим рівнянням зв'язку між моделлю "вхід-вихід" та моделлю стану з параметрами  $A, \bar{b}, \bar{c}^T, d$ . У обчислювальному аспекті в рівнянні (2.9) найбільш складним є отримання зворотної матриці  $(pE - A)^{-1}$  як функції від  $p$ . Зрозуміло, що звичайні методи інверсії чисельних матриць в цьому випадку неприйнятні. Як особливий може бути використаний алгоритм Фадєєва [18]. Результатом його використання є така форма:

$$(pE - A)^{-1} = \frac{R_0 p^{n-1} + R_1 p^{n-2} + \dots + R_{n-1}}{S_1 p^n + S_2 p^{n-1} + \dots + S_n p + S_{n+1}}, \quad (2.10)$$

де  $R_i$  — матриці,  $S_i$  — коефіцієнти;  $R_i, S_i$  утворюються через допоміжні матриці  $D_i$  за схемою:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1; & R_0 &= E; & D_1 &= A; \\ S_2 &= -S_p(D_1); & R_1 &= D_1 + S_2 E; & D_2 &= AR_1; \\ S_3 &= \frac{-S_p(D_2)}{2}; & R_{31} &= D_2 + S_3 E; & D_3 &= AR_2; \\ &\dots & & & & \\ S_n &= \frac{-S_p(D_{n-1})}{n-1}; & R_{n-1} &= D_{n-1} + S_n E; & D_n &= A \cdot R_{n-1}; \\ S_{n+1} &= \frac{-S_p(D_n)}{n}; & R_n &= D_n + S_{n+1} E = 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

У схемі (2.11):  $\text{sp}(D)$  — слід матриці  $D$ , тобто сума елементів її головної діагоналі;  $S_i$  завжди дорівнює одиниці; матриця  $R_n$  обчислюється лише для оцінки точності і перевірки правильності обчислень.

З (2.10) та (2.9) тепер можна дістати для шуканої  $W(p)$ :

$$W(p) = c^{-T} \frac{Ep^{n-1} + R_1 p^{n-2} + \dots + R_{n-1}}{S_1 p^n + S_2 p^{n-1} + \dots + S_{n+1}} \bar{b} + d. \quad (2.12)$$

Якщо привести (2.12) до спільного знаменника, дістанемо

$$W(p) = \left[ \bar{c}^T b p^{n-1} + \bar{c}^T R_1 \bar{b} p^{n-2} + \dots + \bar{c}^T R_{n-1} \bar{b} + d(S_1 p^n + S_2 p^{n-1} + \dots + S_{n+1}) \right] / (S_1 p^n + S_2 p^{n-1} + \dots + S_{n+1}). \quad (2.13)$$

Вирази  $\bar{C}^T R_i \bar{b}$  є скалярними коефіцієнтами, їх можна замінити через  $b_i$ :

$$h_i = \bar{c}^T R_{n-i} \bar{b}. \quad (2.14)$$

Якщо згрупувати в чисельнику (2.13) члени з однаковими степенями  $p$ , то знайдуться коефіцієнти  $a_i, b_i$ , вихідної передавальної функції у формі (2.2):

$$\begin{array}{lll} p^0 : & b_0 = h_1 + dS_{n+1} & a_0 = S_{n+1} \\ p^1 : & b_1 = h_2 + dS_n & a_1 = S_n \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ p^{n-1} : & b_{n-1} = h_n + dS_2 & a_{n-1} = S_2 \\ p^n : & b_n = dS_1 = d & a_{n1} = S_1 = 1. \end{array} \quad (2.15)$$

На рис.2.1 показано алгоритм Фаддєєва, за яким здійснюється в програмі SWW розрахунок коефіцієнтів поліномів чисельника і знаменника передавальної функції.

Як вихідні дані для цієї програми використовується лінійна форма моделі стану, ввід матриць якої виконується як завжди у діалозі із споживачем. В рядках '3' та '4' використовується допоміжний вектор  $i$ , за допомогою якого розраховується добуток  $\bar{C}^T R b$  в два етапи. Коефіцієнти знаменника  $a_i$  позначені через  $S_{n+1}, \dots, S_1$  (рядок '6'), так, як у (2.15). Коефіцієнти чисельника  $b_i$  розраховуються у другому циклі (рядок '11'). Всі ці розрахунки і вивід результатів виконуються у головній програмі.

Розглянемо приклади розрахунків за допомогою програми SWW коефіцієнтів різних передавальних функцій. Як вхідні дані використано: моделі стану об'єктів, що лінеаризовані в околі робочої точки — це результати роботи програми LMS; моделі стану замкнених контурів керування — результати роботи програми RSK. В табл.2.1 наведено результати роботи програми SWW.



Рис.2.1. Алгоритм розрахунку коефіцієнтів поліномів передавальної функції

Таблиця 2.1

Коефіцієнт	Коефіцієнти передавальних функцій W(p)			
	Технологічний об'єкт		Контур керування з ПІ-законом	
	Приклад 1	Приклад 2	Приклад 1	Приклад 2
$b_0$	4.341E-4	1.224E-3	639852.4	9.180E-4
$b_1$	.1566	.0147	-1865.3	1.965E-2
$b_2$	7.1195	0	-99.67	.103
$b_3$	63.990		-332.44	0
$b_4$			447.94	
$a_0$	1.031E-8	2.599E-3	28059.3	8.150E-4
$a_1$	9.642E-5	6.473E-2	-441.98	2.225E-2
$a_2$	6.950E-3	.483	-112.81	.168
$a_3$	.1504	1	-332.53	.483
$a_4$	1		448.09	1
$a_5$			1	

## 2.2. Розрахунок власних значень, програма RHP

Велике значення для оцінки динамічних властивостей лінійних систем мають їхні власні значення (числа)  $p_i$ . Це є незалежним від форми моделей, якими описуються ці системи: система порядку  $n$  має рівно  $n$  власних значень. Власні значення можуть бути простими або кратними, дійсними або комплексними. З кожним власним значенням пов'язаний характер поведінки системи у функції часу (рис.2.2).

Дійсні власні значення зумовлюють монотонні зміни поведінки системи у функції часу (рис.2.2, а,б,в). Комплексні власні значення бувають завжди комплексно-спряженими. Вони викликають коливальні зміни за часом. Негативні дійсні (рис.2.2, а) або комплексні з негативною дійсною частиною (рис.2.2, г) дають загасаючі за часом процеси (стійкі). Позитивні дійсні або комплексні з позитивною дійсною частиною (рис.2.2, в,є) зумовлюють незгасаючі, розбіжні за часом процеси (нестійкі). Процеси, що зображені на рис.2.2, б, д, відповідають межі стійкості.

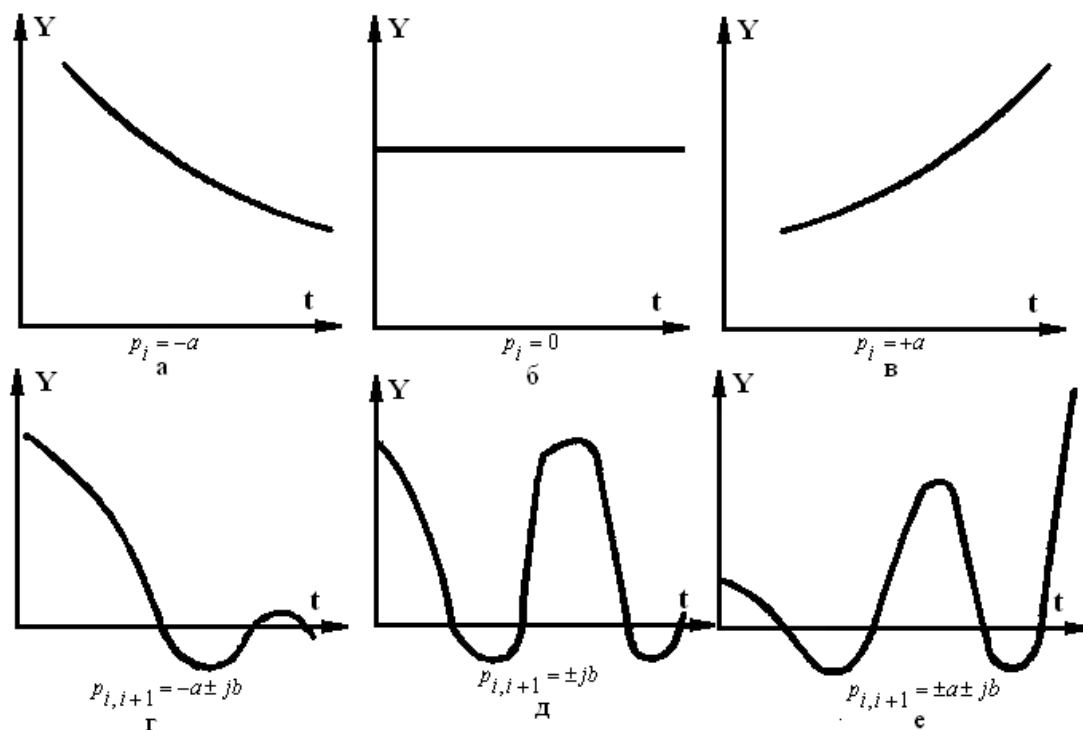


Рис.2.2. Зв'язок між власними значеннями та характером поведінки системи за часом

Власні значення системи одержуються з її матриці стану  $A$  згідно з матричним рівнянням

$$|pE - A| = 0 \quad (2.16)$$

Якщо ж система задана моделлю "вхід-вихід" у формі передавальної функції (2.2), то характеристичне рівняння (поліном) відносно власних значень матиме вигляд

$$F(p) = a_0 + a_1 p + \mathbf{L} + a_n p^n = 0 \quad (2.17)$$

Залежність (2.16) для обчислення власних значень квадратної матриці  $A$  зводиться до рішення полінома степеня  $n$  у формі (2.17), коефіцієнти якого  $a_i$  утворюються з елементів  $a_{ij}$  матриці  $A$ . Таким чином, визначення власних значень динамічної системи потребує подальших двох кроків: 1) побудову характеристичного полінома; 2) обчислення коренів характеристичного полінома.

Якщо модель зображена у формі передавальної функції, п.1 виконувати не треба.

Побудова характеристичного полінома з матричного рівняння (2.16) виконується шляхом розгортання такого визначника:

$$\begin{vmatrix} p - a_{11} & -a_{12} & \mathbf{L} & -a_{1n} \\ -a_{21} & p - a_{22} & \mathbf{L} & -a_{2n} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \mathbf{L} & p - a_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (2.18)$$

Безпосереднє розгортання (2.18) практично можливо лише для невисоких (2—3) порядків. Для більших  $n$  застосовується алгоритм, згідно з яким коефіцієнти характеристичного полінома будуються за допомогою чисельних методів. В основу покладений вже відомий алгоритм Фадєєва (див.п.2.1). Характеристичний поліном будуюмо з коефіцієнтами  $k_2, \dots, k_{n+1}$  у такій формі

$$F(p) = p^n + k_2 p^{n-1} + k_3 p^{n-2} + \mathbf{L} + k_{n+1} = 0. \quad (2.19)$$

Коефіцієнти обчислюються за схемою (2.20) за участю допоміжної матриці  $S(n,n)$ :

$$\begin{aligned} T_1 &= A, & k_2 &= -S_p(T_1), & S_1 &= T_1 + k_2 E; \\ T_2 &= AS_1, & k_3 &= -\frac{S_p(T_2)}{2}, & S_2 &= T_2 + k_3 E; \\ & & & & \mathbf{L} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$T_{n-1} = AS_{n-2}, \quad k_n = -\frac{S_p(T_{n-1})}{2}, \quad S_{n-1} = T_{n-1} + k_n E;$$

$$T_n = AS_{n-1}, \quad k_{n+1} = -\frac{S_p(T_n)}{n}.$$

Для обчислення  $n$  коренів (нулів)  $p_1, \dots, p_n$  полінома (2.17) застосовуємо єдиний підхід з використанням чисельних методів [11,16]. На рис.2.3 зображено алгоритм реалізації цього підходу. В поясненнях невідомі позначені символом  $x$ . Після знаходження приблизного значення дійсного кореня (рядок Т), якщо степінь полінома  $n$  непарна (існує у всякому разі один дійсний корінь), в рядку '3' виконується обчислення його уточненого значення. Потім шляхом ділення полінома  $P(x)$  на двочлен  $(x - x_1)$  може бути одержаний перетворений поліном степеня  $(n - 1)$  та ін. Процес має бути повторений доти, доки не буде одержано квадратне рівняння ( $n = 2$ , рядок '5'), розв'язок якого може бути наведено в параметричній формі (рядок '9'). Якщо приблизне значення для дійсного кореня не може бути знайдене (рядок'2 ), то це означає, що поліном ( $n$  — парне) має тільки комплексно-спряжені корені.

В рядку '6' відшукується пара коренів  $x_i, \bar{x}_i$  ( $x_i$  - комплексно-спряжений).

Ділення полінома на пару  $(x - x_i)(x - \bar{x}_i)$  дає перетворений поліном степеня  $(n - 2)$  — рядок '7. Далі процес продовжується, доки  $n$  не стане дорівнювати 2 (рядок '8').

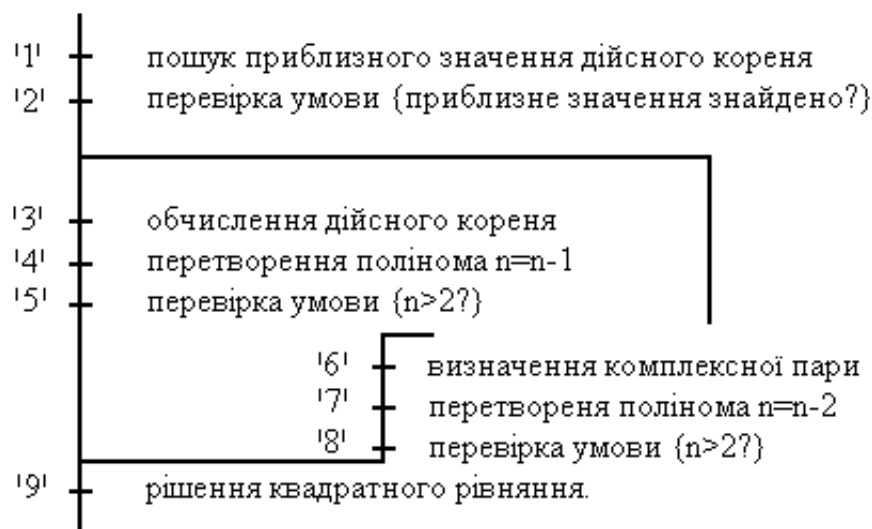


Рис.2.3. Алгоритм обчислення коренів полінома

Звернемось тепер до уточнення деяких питань алгоритму. Рядок V може бути пояснений за допомогою рис.2.4.

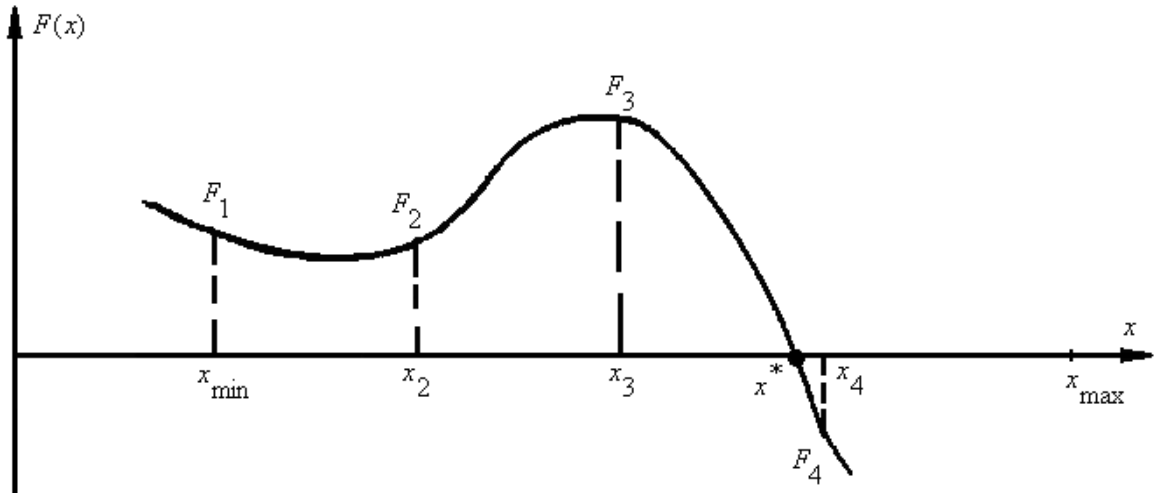


Рис.2.4. До визначення приблизного значення дійсного кореня

Після того як визначається інтервал, в якому припускається існування одного кореня, починається послідовне обчислення значень функції  $F_1, F_2, \dots$ . Приблизне значення функції знайдено, якщо два послідовні значення функції мають різні знаки (на рис.2.4 —  $F_3, F_4$ ). Дійсний корінь (рядок '3') обчислюється за методом Ньютона (див.гл.1, п.1.4) шляхом ітеративного уточнення його приблизного значення. Для цього, як відомо, потрібні значення функції та її похідної. Обчислення цих двох значень, а також значень коефіцієнтів полінома, степінь якого на одиницю менша за степінь вихідного (рядок '4'), робиться за допомогою широковідомої схеми Горнера [11,16] (табл.2.2).

Таблиця 2.2

Схема Горнера для визначення коефіцієнтів перетвореного полінома

$x_0$	+	$a_n$	$a_{n-1}$	$a'_{n-2}$	$\dots$	$a_1$	$a_0$
			$a'_n \cdot x_0$	,	$\dots$	$a'_{2 \cdot x_0}$	$a'_{1 \cdot x_0}$
$x_0$	+	$a'_n$	$a'_{n-1}$	$a'_{n-2}$	$\dots$	$a'_1$	$F(x_0)$
			$a''_n \cdot x_0$	„	$\dots$	$a''_{2 \cdot x_0}$	
		$a''_n$	$a''_{n-1}$	$a''_{n-2}$	$\dots$	$F(x_0)$	

Внаслідок застосування схеми Горнера обчислюється значення полінома при  $x = x_i$   $F(x_i)$ . Якщо  $x = x_0$  є корінь полінома, то  $F(x_0) = 0$ ; значення  $a'_n, a'_{n-1}, \dots, a'_1$  є коефіцієнтами перетвореного полінома степеня  $(n - 1)$ .

Визначити комплексну пару коренів (рядок 'б') можна за допомогою вже відомого Ньютонівського методу (див.гл.1, п.1.3, формула (1.46)). Значення  $F$  та  $F'$  будуть в цьому випадку комплексними:

$$F = F_r + jF_i; \quad F' = F'_r + jF'_i, \quad (2.21)$$

де  $F_r$  та  $F_i$  — відповідно істинна та уявна частини;  $j = \sqrt{-1}$  — уявна одиниця.

Згідно з правилами обчислень для комплексних чисел можна одержати з (1.46) для уточненого значення наближення:

$$x_1 = x_0 - \frac{F_2 + jF_i}{F'_r + jF'_i} = x_0 - \frac{F_r F'_r + F_i F'_i + j(F_i F'_r - F_r F'_i)}{F_r'^2 + F_i'^2}. \quad (2.22)$$

Умовою закінчення ітераційного процесу тепер буде:

$$|F|^2 = F_r^2 + F_i^2 \leq eps. \quad (2.23)$$

Функції  $F_r$ ,  $F_i$ ,  $F'_r$ ,  $F'_i$ , а також коефіцієнти перетвореного полінома  $n = n - 2$  (рядок '7') можна обчислити за допомогою так званої схеми Колатца [16] (табл.2.3). Якщо  $x_0 = p + jq$  — корінь полінома, то  $a'_1 = a'_0 = 1$ . В цьому випадку  $a'_n, \dots, a'_2$  — коефіцієнти перетвореного полінома степеня  $(n - 2)$ :

$$a'_n x^{n-2} + a'_{n-1} x^{n-3} + \dots + a'_3 x + a'_2$$

І нарешті, рядок '9'. Як результат послідовного перетворення залишається квадратне рівняння

$$a'_n x^2 + a'_{n-1} x + a'_{n-2} = 0.$$

Його розв'язок визначається таким чином

$$x_{1,2} = \begin{cases} -\frac{a'_{n-1}}{2a'_n} \pm \sqrt{\left(\frac{a'_{n-1}}{2a'_n}\right)^2 - \frac{a'_{n-2}}{a'_n}} & \text{при } \left(\frac{a'_{n-1}}{2a'_n}\right)^2 \geq \frac{a'_{n-2}}{a'_n} \\ -\frac{a'_{n-1}}{2a'_n} \pm j \sqrt{\frac{a'_{n-2}}{a'_n} - \left(\frac{a'_{n-1}}{2a'_n}\right)^2} & \text{при } \frac{a'_{n-2}}{a'_n} > \left(\frac{a'_{n-1}}{2a'_n}\right)^2 \end{cases}$$



Програма RHP містить головний модуль, який виконує у діалозі із споживачем пошук власних значень характеристичного полінома.. У програмі є три підпрограми: BHP — будування характеристичного полінома з матриці стану A; GOR — схема Горнера; KOL — схема Колатца.

Таблиця 2.3

Схема Колатца для визначення коефіцієнтів перетвореного полінома для комплексного  $X_0$

Допоміжні величини $t = p^2 + q^2$ ; $s = -2 \cdot p$								
	$a_n$	$a_{n-1}$	$a_{n-2}$	<b>L</b>	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
t	+		$-t \cdot a'_n$	<b>L</b>	$-t \cdot a'_5$	$-t \cdot a'_4$	$-t \cdot a'_3$	$-t \cdot a'_2$
s		$-s \cdot a'_n$	$-s \cdot a'_{n-1}$	<b>L</b>	$-s \cdot a'_4$	$-s \cdot a'_3$	$-s \cdot a'_2$	
	$a'_n$	$a'_{n-1}$	$a'_{n-2}$	<b>L</b>	$a'_3$	$a'_2$	$a'_1$	$a'_0$
t	+		$-t \cdot a''_n$	<b>L</b>	$-t \cdot a''_5$	$-t \cdot a''_4$		
s		$-s \cdot a''_n$	$-s \cdot a''_{n-1}$	<b>L</b>	$-s \cdot a''_4$			
	$a''_n$	$a''_{n-2}$	$a''_1$	<b>L</b>	$a''_3$	$a''_2$		

Результат:

$$F(x_0) = a'_1 x_0 = a'_1 p + a'_0 + ja'_1 q$$

$$F'(x_0) = b_1 x_0 + b_0$$

$$\text{при } b_1 = 2a''_2 - sa''_3; b_0 = sa''_2 - 2ta''_3 + a'_1$$

За допомогою програми RHP було розраховано декілька прикладів. Для матриці A (див. табл.1.5, перша точка) спочатку було знайдено характеристичний поліном:

$$2,599E-3 + 6,473E-2 \cdot p + 0,48 \cdot 3p^2 + p^3,$$

а потім визначено три його корені

$$-7,998E-2; -3,250E-2; -37,054.$$

Для матриці A (див. табл.1.4, перша точка) характеристичний поліном має вигляд

$$1,031E-8 + 9,640E-5 \cdot p + 6,594E-3 \cdot p^2 + 0,150 \cdot p^3 + p^4.$$

Серед чотирьох коренів полінома два виявилися комплексно-спряженими:

$$5,442\text{E-}2 \pm j \cdot 9,908\text{E-}4; -3,220\text{E-}2; -0,227.$$

Матриця  $A^*$  (табл.6, перша точка) має характеристичний поліном:

$$9.180\text{E-}4 + 2.225\text{E-}2 p + 0,168 \cdot p^2 + 0,483 \cdot p^3 + p^4$$

і також комплексно-спряжені корені:

$$-7.817\text{E-}2 \pm j \cdot 9.392\text{E-}5; -0,111; -0,215.$$

### Глава 3. Дискретні лінійні моделі

В дискретних моделях безперервний час  $t \geq 0$  розподілений на дискретні частини, тобто представлений у вигляді послідовності точок  $kT$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Таким чином, можна вже казати про дискретні за часом, або просто дискретні моделі [ 7 ]. Дискретні моделі можна особливо виразно уявити внаслідок використання цифрових засобів для керування технологічними процесами (рис.3.1).

Значення вектора виходу  $Y(t)$  (дані про технологічний процес) надходять до ЦОМ у дискретні моменти часу (рис.3.1,а). Вектор керування  $U(t)$  є кусково-постійною функцією часу: він розривний у моменти закінчення обчислень та видання керуючих діянь і постійний протягом усього іншого часу (рис.3.1,б). У таких системах використовуються спеціальні пристрої: аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та цифроаналоговий перетворювач (ЦАП).

Важливим є питання про вибір оптимального інтервалу квантування (або дискретизації)  $T$ . Цілком природним є прагнення до збереження максимально можливої близькості між процесами у безперервному часі, що відбуваються в технологічному процесі (або системі-оригіналі) та процесами, що відбуваються у дискретному часі (в системі-моделі). Інтервал квантування можна було б обирати якомога меншим, але саме поняття меншого слід сприймати тільки у співвідношенні з величинами постійних часу технологічного процесу, тобто з його динамікою. Виходячи з того, що постійні часу системи  $T_k$  дорівнюють від'ємним значенням зворотних величин її власних значень:

$$T_k = -\frac{1}{p_k} \quad (3.1)$$

інтервал квантування будемо обирати у зв'язку з найменшою постійною часу. З фізичних міркувань такий підхід гарантує, що технологічний процес залишиться під контролем працюючої у дискретному часі системи керування як мінімум у сенсі своєчасного усунення аварійних ситуацій.

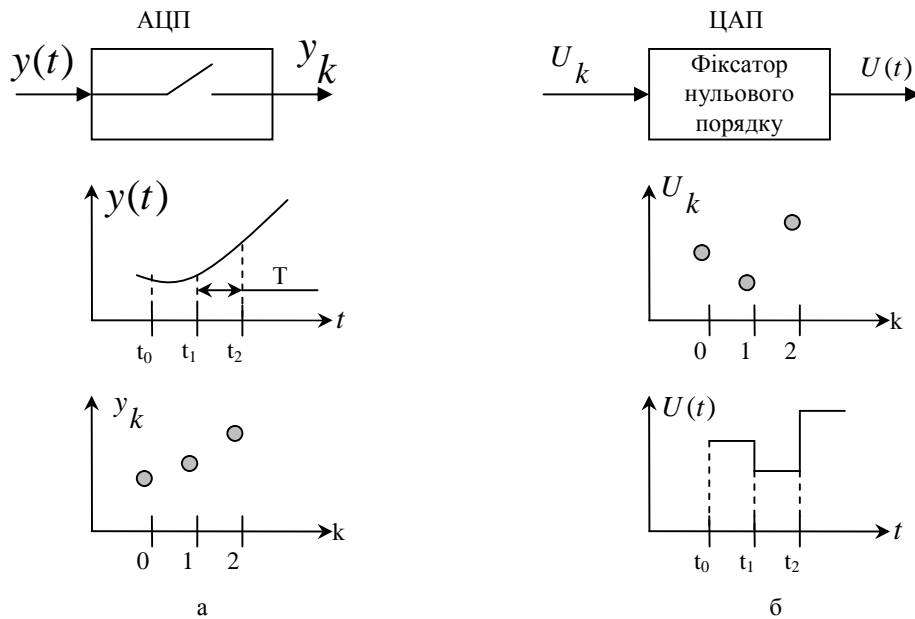


Рис.3.1. Дискретизація функцій часу: а — вихід  $y(t)$ ; б — керування  $U(t)$

Так, для розглянутого нами прикладу (установка газопостачання) за допомогою програми RHP здобуто такі власні значення:

$$p_1 = -0,08 ; \quad p_2 = -0,1118 ; \quad p_3 = -0,2913 ;$$

$$T_1 = 1/0,08 = 12,5 ; \quad T_2 = 1/0,1118 = 8,94 ; \quad T_3 = 1/0,2913 = 3,43.$$

Виходячи з цього, інтервал квантування може бути обраний меншим за 3,43. Наприклад,  $T=1$  є цілком задовільним.

### 3.1. Дискретизація моделей стану

Рівняння моделей стану у безперервному часі у припущенні лінійних залежностей мають вигляд:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A\bar{X}(t) + B\bar{U}(t); \quad (3.2)$$

$$\bar{Y}(t) = C\bar{X}(t) + D\bar{U}(t). \quad (3.3)$$

В дискретних моделях на місцях  $\bar{U}(t)$ ,  $\bar{X}(t)$  та  $\bar{Y}(t)$  з'являються відповідні послідовності дискретних за часом значень  $u_k$ ,  $x_k$  та  $y_k$  (риску над ними будемо опускати, але розумітимемо, що це завжди вектор) дістаємо:

$$X_{k+1} = pX_k + RU_k; \quad (3.4)$$

$$Y_k = cX_k + DU_k. \quad (3.5)$$

Таким чином, матриці рівнянь виходу внаслідок дискретизації не змінились, а до рівнянь стану увійшли нові матриці:  $P$  (фундаментальна матриця системи) та  $R$  (матриця керування). Ця обставина може бути пояснена таким чином. Щоб перейти від безперервного рівняння стану (3.2) до дискретного (3.4), необхідно розв'язати рівняння, що описує вихідну безперервну систему і в одержаному результаті використати тільки ті значення, які відповідають моментам квантування. Як відомо, розв'язок (3.2) складається з двох частин: вільної, якою описується рух при нульовому вході, та вимушеної, якою описується рух під впливом керування:

$$\bar{X}(t) = \Phi(t, t_0)\bar{X}(t_0) + \int_0^t \Phi(t, r)B(r)\bar{U}(r)dr \quad (3.6)$$

Тут  $\Phi(t, t_0) = e^{A(t-t_0)}$  — функція від матриці  $A$ , матрична експонента, яка може бути розкладена в ряд Тейлора [17]. Якщо тепер взяти інтервал квантування  $T$  та використати позначення  $P$  і  $R$ , одержуємо такі залежності:

$$P = e^{AT} = E + AT + A^2 \frac{T^2}{2} + A^3 \frac{T^3}{3!} + \dots + A^k \frac{T^k}{k!}; \quad (3.7)$$

$$R = [(e^{AT} - E)A^{-1}]B = [ET + A \frac{T^2}{2} + A^2 \frac{T^3}{3!} + \dots + A^k \frac{T^{k+1}}{(k+1)!}]B. \quad (3.8)$$

На практиці обчислення матричних степеневих рядів (3.7) та (3.8) виконується лише з кінцевою кількістю доданків. Обчислення припиняються за таким критерієм:

$$\|A^k\| \frac{T^k}{k!} \leq eps, \quad (3.9)$$

де

$$\|A^k\| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \quad (3.10)$$

є нормою матриці A.

На рис.3.2 зображено алгоритм обчислення матриць P та R

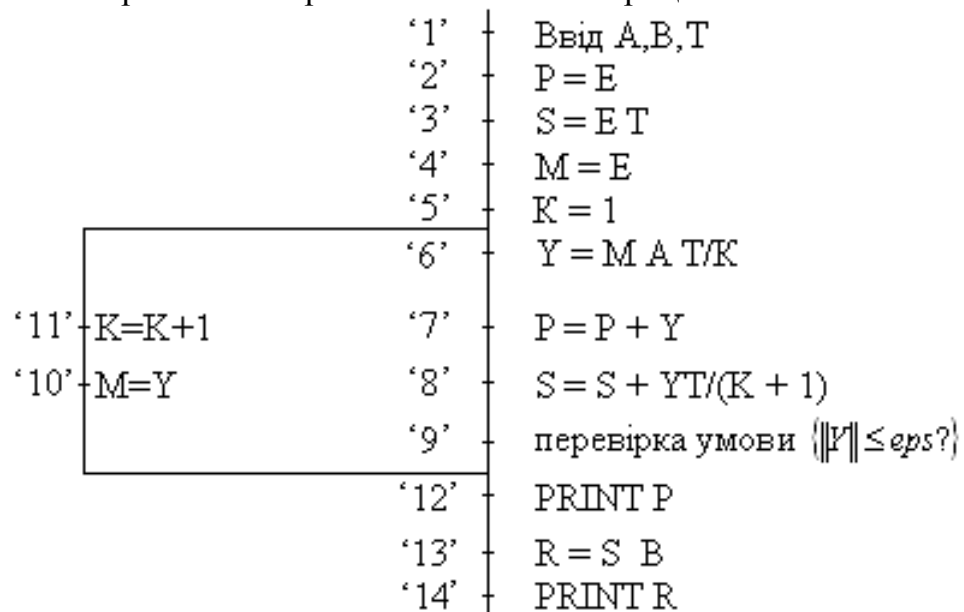


Рис.3.2. Алгоритм обчислення матриць P та R

В алгоритмі використані проміжні матриці M, S, Y. В матриці Y містяться члени ряду:

$$Y_k = A^k \frac{T^k}{k!}.$$

Матриця  $M$  відповідає  $Y_{k-1}$ , (рядок '10'), а  $Y_k$  обчислюється в рядку '6' за рекурсивною залежністю  $Y_k = Y_{k-1} AT/K$ .

Матриця керування  $R$  обчислюється в рядку '13' як  $S B_0$ .  $S$  відповідає сумі, що стоїть в правій частині (3.8). Норма  $\|Y\|$  обчислюється в рядку '9'.

### 3.2. Вирішення дискретних рівнянь стану, програма DRS

Дискретне рівняння стану (3.4) та рівняння виходу (3.5) можна розв'язати безпосередньо шляхом організації рекурсивних цифрових обчислень. Для цього мусять бути задані:

початковий стан  $X(k=0) = X_0$ ;

послідовність значень входу  $U_0, U_1, \dots, U_k$ .

Спочатку дістанемо з (3.5):

$$Y_0 = CX_0 + DU_0, \quad (3.11)$$

а з (3.6):

$$X_1 = PX_0 + RU_0. \quad (3.12)$$

Відповідно далі маємо:

$$Y_1 = CX_1 + DU_1;$$

$$X_2 = PX_1 + RU_1 \quad \text{та ін.}$$

Послідовність значень входу може бути задана або в простішому випадку за допомогою одного оператора INPUT, або для закономірно змінюваних за часом сигналів - за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке входить до складу програми DRS(додаток).

Функція одиничного східчастого збурення  $U_k = U_0 = \text{const}$  для всіх значень  $k$ ,  $U_0$  — амплітуда сигналу. У цьому випадку система рівнянь (3.4),(3.5) має простий розв'язок, який в точках дискретизації збігається з рішенням безперервної системи незалежно від того, яким буде обраний інтервал дискретизації  $T$ .

Синусоїдальна функція безперервного типу  $U(t) = U_0 \sin(kwt)$  внаслідок дискретизації набуває вигляду:

$$U_k = U_0 \sin(kwT). \quad (3.13)$$

Розв'язок рівняння (3.4) ґрунтується на припущенні про те, що  $U$  залишається незмінним між двома сусідніми точками дискретизації, тобто  $U(t) = U_k$  для  $kT \leq t \leq (k+1)T$ . Алгоритм обчислює рішення

системи рівнянь для одного циклу вхідних сигналів. Такий цикл створюється на базі вихідної синусоїди (рис.3.3). При такому поданні синусоїди виникає похибка, розмір якої буде тим меншим, чим меншим виявиться відношення інтервалу дискретизації  $T$  до тривалості періоду  $T_{\Pi}$ .

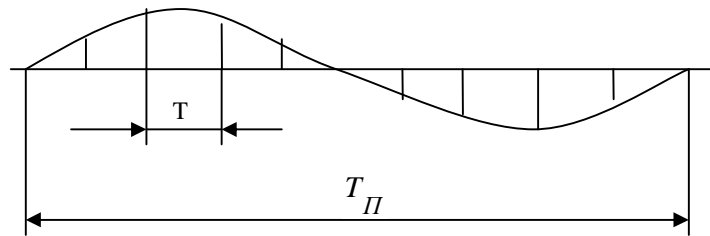


Рис.3.3. Дискретизація синусоїди

У програмі DRS закладено відношення:

$$\frac{T}{T_{\Pi}} = \frac{Tw}{2p} \leq \frac{1}{8},$$

звідки

$$wT \leq \frac{p}{4}. \quad (3.14)$$

Стохастичні випадкові діяння на технологічний процес (динамічну систему) є цілком характерними. Моделі стану містять у собі добрі можливості для подання таких сигналів в найбільш загальному вигляді  $Z(t)$  (1.4). Вихідним є так званий "білий" шум — процес, за яким між двома скільки завгодно близькими за часом сигналами нема ніякого зв'язку, кореляція відсутня. Білий шум використовується тоді, коли спектр збурення  $Z(t)$  значно ширший за полосу пропускання технологічного процесу. З білого шуму можна виробити інший, так званий "кольоровий шум" шляхом фільтрації сигналів. Кольоровий шум використовується тоді, коли спектр збурення менший (вужчий) за полосу пропускання даного процесу. Як фільтри для одержання конкретної моделі збурення використовуються відомі із техніки регулювання та керування ланки першого і більш високих ступенів з запізненням. Для кожного з таких фільтрів можна записати рівняння стану з використанням в якості вектора стану  $X_{\phi}$  керуючого діяння - сигналу білого шуму  $W$ , вихідної величини  $Y_{\phi}$  — відфільтрованого сигналу білого шуму:

$$\frac{d\bar{X}_{\Phi}}{dt} = A_{\Phi} \bar{X}_{\Phi} + B_{\Phi} \bar{W}; \quad (3.15)$$

$$\bar{Y}_{\Phi} = \bar{C}_{\Phi}^T \bar{X}_{\Phi}. \quad (3.16)$$

Далі, у припущенні, що процес знаходиться тільки під впливом цього сигналу як вхідного (керування) можна знайти поширений вектор стану для замкненого контуру та розробити його узагальнену лінійну модель (див.гл.1, п.1.5). У програмі DRS як вихідний використовується вже не безперервний, а дискретний випадковий сигнал. Його одержують за допомогою стандартної функції RND, вихідний сигнал якої еквівалентний сигналу білого шуму.

Таким чином, тепер можна сформулювати вимоги, яким мусить задовольняти в цілому програма DRS:

- 1) можливість розрахунку на основі матриці безперервних лінійних моделей стану матриць P та R дискретних моделей стану;
- 2) можливість розв'язку дискретних рівнянь стану та визначення вихідних сигналів при різних вхідних;
- 3) як вхідні сигнали передбачити: одиничне східчасте збурення, синусоїдальну та випадкову функції;
- 4) функції вводу даних та виводу результатів (таблиця, графік) організувати у діалозі із споживачем.

Використання програми DRS за п.1 — одержання матриць P та R дискретних моделей — для розглянутого прикладу 2 дало результати, які наведені в табл. 3.1. Слід звернути увагу на те, що, як і слід було очікувати, величина T впливає на результат.

Використання програми DRS за п.2 здійснюється у діалозі споживачем. Після встановлення кількості параметрів стану, входу та виходу треба зазначити, для яких саме входів-виходів будуть виконуватися розрахунки та побудова почасових характеристик. В процесі роботи залишається можливість повернення до попередніх етапів з метою зміни деяких умов: інтервалу дискретизації, масштабу, початкових умов.

На рис.3.4 зображені реакції об'єкта та замкненого контура (табл.3.1) на одиничний поштовх, одержані графічно за допомогою програми DRS.



## Матриці дискретних моделей

Об'єкт.  $n=3$ .

T=1

$$P = \begin{pmatrix} 0.923 & 0 & 0 \\ 0.148 & 1.777 & 0.040 \\ 7.79E-3 & 0.088 & 0.865 \end{pmatrix};$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.254 & 0 \\ 0.021 & -144E-3 \\ 7.310E-4 & -0.062 \end{pmatrix};$$

T=2

$$P = \begin{pmatrix} 0.852 & 0 & 0 \\ 0.252 & 0.607 & 0.065 \\ 0.027 & 0.144 & 0.751 \end{pmatrix};$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.488 & 0 \\ 0.074 & -5.505E-3 \\ 5.198E-3 & -0.116 \end{pmatrix};$$

Замкнений контур  $n=4$ .

T=1

$$P = \begin{pmatrix} -0.877 & -0.504 & 0.321 & -0.187 \\ 0.145 & 0.734 & 0.067 & -0.015 \\ 7.90E-3 & 0.086 & 0.865 & -5.43E-4 \\ 0.243 & 0.268 & -0.172 & 0.988 \end{pmatrix};$$

$$R = \begin{pmatrix} 1.842 & -0.011 \\ 0.149 & -0.0021 \\ 0.0052 & -0.062 \\ -0.984 & 0.006 \end{pmatrix};$$

T=2

$$P = \begin{pmatrix} 0.694 & -0.834 & 0.558 & -0.344 \\ 0.235 & 0.467 & 0.156 & -0.054 \\ 0.026 & 0.133 & 0.757 & -0.0038 \\ 0.083 & 0.438 & -0.294 & 0.988 \end{pmatrix};$$

$$R = \begin{pmatrix} 3.571 & -0.041 \\ 0.542 & -0.0095 \\ 0.037 & -0.116 \\ -1.882 & 0.022 \end{pmatrix};$$

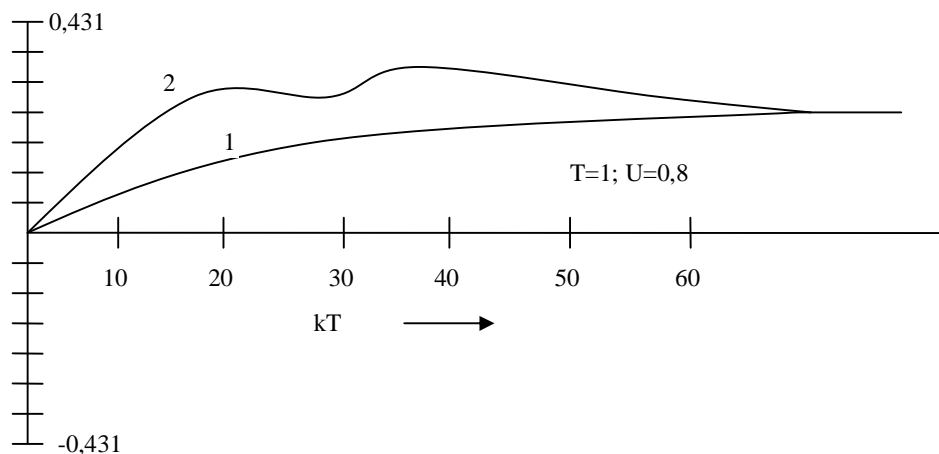


Рис.3.4. Часові характеристики: 1 — об'єкт; 2 — замкнений контур

### 3.3. Дискретні моделі "вхід — вихід"

У загальному вигляді при одному вході та одному виході дискретні моделі "вхід-вихід" так само як і безперервні (див.гл.2) можуть мати форму або звичайних диференціальних рівнянь з похідними за часом від вхідних та вихідних величин, або форму передавальних функцій. Головна різниця визначається дискретним характером часу. Моделі "вхід-вихід" дискретних систем установлюють зв'язок між послідовностями значень вхідної величини  $U_k$  та вихідної  $Y_k$ . Загальною формою такого зв'язку є кінцево-різницева диференціальне рівняння такого виду:

$$\begin{aligned} h_n y_{k-n} + h_{n-1} y_{k-n+1} + \dots + h_1 y_{k-1} + h_0 y_k = \\ = g_0 u_k + g_1 u_{k-1} + \dots + g_n u_{k-n}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

де  $h_i, g_i$  — коефіцієнти,  $i = \overline{0, n}$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots$  відповідає інтервалам  $kT$  на осі часу.

Якщо взяти за вихідне диференціальне рівняння (2.1), в ньому замінити всі похідні їх кінцево-різницевою поданням, потім всі кінцеві різниці виразити через значення функцій, то після групування виникнуть нові коефіцієнти  $h_i, g_i$ , а рівняння (2.1) набере вигляду (3.17). Зазначимо також, що в цьому рівнянні  $y_{k-i}$  позначає значення  $y$ , яке відноситься до точки дискретизації, розміщеної за  $i$  ділянок розбиття осі до безпосередньо розглядуваної точки  $k$ . До послідовностей  $y$  та  $u$  не повинні входити такі значення, що мають від'ємні індекси, тобто  $\bar{y}_{k-i} = 0, \bar{u}_{k-i} = 0$ , якщо  $k < i$ , що відповідає умові  $t \geq 0$ .

Для того щоб модель "вхід-вихід" зобразити у формі передавальної функції, треба розглянути питання про  $z$ -перетворення. Щоб визначити, що є  $z$ -перетворення, звернемось спочатку до перетворення Фур'є часової функції  $x(t)$  в частотну  $X(f)$ :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (3.18)$$

Запишемо (3.18) для дискретної функції  $x(k)$ , тобто для послідовності дискретних величин, що відповідають моментам часу  $kT$ :

$$X(f) = T \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \exp(-j2\pi f kT) \quad (3.19)$$

Зробимо в (3.19) заміну: замість  $\exp(-j2\pi f kT)$  поставимо символ " $z$ ". Тепер (3.19) набере вигляду:

$$X(z) = T \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)z^{-k} \quad (3.20)$$

Це і є формула z-перетворення.

Крім спрощення запису (замість 10 символів потрібен лише один) використання z-перетворення означає те, що  $z$  є оператором зсуву, який або підвищує, або знижує значення індексу в послідовності. Перемноження з  $z$  означає підвищення індексу на одиницю, перемноження з  $z$  — підвищення на  $i$ . Відповідно, перемноження з  $z^{-1}$  означає зниження індексу на одиницю, а з  $z^{-i}$  — на  $(-i)$ .

Якщо  $X(z)$  є z-перетворенням послідовності  $x_k$ , то  $z^{-1}X(z)$  відповідає зсуву індексу:  $x_{k-i}$ . Виходячи з цього, рівняння (3.17) можна ш писати:

$$(h_n z^{-n} + h_{n-1} z^{-n-1} + \dots + h_1 z^{-1} + h_0) y(z) = (g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_n z^{-n}) u(z). \quad (3.21)$$

Тепер є можливість, використовуючи (3.21) записати вираз для z-передавальної функції  $W(z)$ :

$$W(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_n z^{-n}}{h_0 + h_1 z^{-1} + \dots + h_n z^{-n}}. \quad (3.22)$$

Після множення чисельника та знаменника (3.22) на  $z^n$  дістаємо еквівалентну форму, в якій присутні лише додатні степені  $z$ :

$$W(z) = \frac{g_0 z^n + g_1 z^{n-1} + \dots + g_n}{h_0 z^n + h_1 z^{n-1} + \dots + h_n}. \quad (3.23)$$

Розглянемо питання про перехід від дискретної моделі стану до z-передавальної функції. Модель стану для єдиної вхідної величини  $u$  та єдиної вихідної  $y$  має вигляд:

$$\bar{X}_{k+1} = P \bar{X}_k + \bar{r} U_k, \quad (3.24)$$

$$Y_k = \bar{c}^T \bar{X}_k + d U_k, \quad (3.25)$$

де  $P$  — квадратна матриця;  $\bar{r}$  — вектор-стовпець;  $\bar{c}^T$  — вектор-рядок;  $d$  — скаляр.

Якщо виконати  $z$ -перетворення послідовностей  $x_k$ ,  $u_k$  та  $y_k$ , то за умови дорівнювання нулю початкового значення вектора стану  $X_0$ , з (3.24) та (3.25) дістаємо:

$$z\bar{X}(z) = P\bar{X}(z) + \bar{r}u(z); \quad (3.26)$$

$$y(z) = \bar{c}^T X(z) + du(z). \quad (3.27)$$

Далі, аналогічно процедурі такого самого переходу для безперервної моделі "вхід-вихід" (див.п.2.1), рівняння (3.26) вирішуємо відносно  $X(z)$ , а результат підставляємо у (3.27):

$$\begin{aligned} z\bar{X}(z) - P\bar{X}(z) &= \bar{r}u(z); \\ \bar{X}(z)(zE - P) &= \bar{r}u(z); \\ \bar{X}(z) &= (zE - P)^{-1} \bar{r}u(z); \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$y(z) = \left[ \bar{c}^T (zE - P)^{-1} \bar{r} + d \right] u(z). \quad (3.29)$$

Нарешті, для  $z$ -передавальної функції маємо:

$$W(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \bar{c}^T (zE - A)^{-1} r + d. \quad (3.30)$$

Рівняння (3.30) повністю відповідає (2.9), яке є рівнянням зв'язку між моделлю "вхід-вихід" у вигляді передавальної функції та моделлю стану з параметрами  $A$ ,  $b$ ,  $c^T$ ,  $d$ . Між (2.9) та (3.30) існує така відповідність: оператор диференціювання  $p$  — оператор зсуву  $z$ ; матриця системи  $A$  — фундаментальна матриця  $P$ ; вектор-стовпець матриці керування  $b$  — вектор-стовпець матриці керування  $r$ . Внаслідок цієї аналогії  $z$ -передавальну функцію  $W(z)$  можна дістати за допомогою алгоритму Фаддєєва, реалізованого у програмі SWW (див.п.2.1). При цьому матриця  $P$  вводиться на місце матриці  $A$ , вектор  $r$  — на місце вектора  $b$ . В результаті роботи програми дістаємо коефіцієнти чисельника та знаменника 2-передавальної функції у формі (3.22). Результати застосування програми SWW для одержання  $z$ -передавальних функцій на основі дискретних моделей стану для об'єкта та замкнутого контура (див.табл.3.1) наведені нижче.

1. Об'єкт,  $n = 3$ ,  $T = 1$ , матриця  $R$  — перший стовпець.

$$W(z) = \frac{0.489 - 0.861z + 0.348z^2}{-1.415 + 3.972z - 3.565z^2 + z^3}.$$

2. Замкнений контур,  $n = 4$ ,  $T = 1$ , матриця  $R$  — перший стовпець.

$$W(z) = \frac{-0.757 + 2.023z - 1.464z^2 + 0.170z^3}{-0.465 + 1.120z + 0.067z^2 - 1.720z^3 + z^4}.$$

Для дискретних систем з системною матрицею  $P$  також існує характеристичне рівняння:

$$|zE - p| = 0 \quad (3.31)$$

і відповідний характеристичний поліном  $F(z)$ , який виникає або з розрахунку рівняння, або із знаменника  $z$ -передавальної функції (3.23):

$$h_n + h_{n-1}z + \dots + h_0z^n = 0 \quad (3.32)$$

Відміна цього полінома від раніш розглянутого (див.п.2.2) міститься лише у символіці:  $z$  замість  $p$ ,  $P$  замість  $A$ . Програма розрахунку характеристичного полінома RHP може бути використана без обмежень для визначення характеристичного полінома матриці  $P$  у дискретній формі, а також відшукування його коренів. Слід зазначити, що власні значення  $z_i$ , інтерпретуються інакше, ніж власні значення  $p_i$  безперервних систем. Додатні дійсні  $z_i$  відповідають монотонним процесам у послідовностях. Для комплексно-спряжених коренів умовою стійкості є:

$$|z_i| < 1 \quad (3.33)$$

Використання програми RHP для прикладу 2 дало такі результати.  
Об'єкт,  $n=3$ .

$$T=1 ; z_1 = 0.747 ; z_2 = 0.894 ; z_3 = 0.923$$

$$T=2 ; z_1 = 0.558 ; z_2 = 0.800 ; z_3 = 0.852$$

Замкнений контур,  $n=4$

$$T=1 ; z_1 = 0.900 ; z_2 = 0.913 ; z_3 = 0.828 \pm j0.244$$

$$T=2 ; z_1 = 0.809 ; z_2 = 0.845 ; z_3 = 0.626 \pm j0.405$$

### 3.4. Зв'язок між дискретною та безперервною передавальними функціями

Для одержання z-передавальної функції  $W(z)$  з p-передавальної функції  $W(p)$  може бути використаний наближений метод, який за малих величин співвідношень між інтервалами квантування та постійними часу дає добрі результати [17].

Розглянемо рівняння інтегруючої ланки

$$y(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t u(t) dt \quad (3.34)$$

з p-передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{1}{T_I p}. \quad (3.35)$$

Замінімо ідеальний інтеграл його чисельним значенням, одержаним за формулою трапецій:

$$y(k) \approx \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} [u(i) + u(i-1)]. \quad (3.36)$$

Перейдемо до рекурентного співвідношення:

$$y(k) - y(k-1) \approx \frac{T}{2T_I} [u(k) + u(k-1)],$$

а потім до його z-перетворення:

$$y(z) [1 - z^{-1}] \approx \frac{T}{2T_I} [u(z) + u(z)z^{-1}]. \quad (3.37)$$

Тепер можемо записати для я-передавальної функції:

$$W(z) = \frac{y(z)}{u(z)} \approx \frac{T [u(z) + u(z)z^{-1}]}{2T_I u(z) (1 - z^{-1})} \approx \frac{T}{2T_I} \frac{z-1}{z+1} \quad (3.38)$$

При малих інтервалах  $T$  з порівняння (3.35) та (3.38) маємо:

$$\frac{1}{T_I p} = \frac{T}{2T_I} \cdot \frac{z-1}{z+1},$$

звідки

$$p \approx \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}. \quad (3.39)$$

Таким чином, математичний шлях переходу дуже простий: в передавальній функції  $W(p)$  на місці  $p$  ставиться

$$\frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}.$$

Розглянемо приклад розрахунку для передавальної функції другого порядку:

$$W(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}. \quad (3.40)$$

Зробивши заміну і домноживши чисельник та знаменник на  $(z + 1)$ , дістанемо:

$$W(z) = \frac{b_0(z+1)^2 + b_1 \frac{2}{T}(z-1)(z+1) + b_2 \frac{4}{T^2}(z-1)^2}{a_0(z+1)^2 + a_1 \frac{2}{T}(z-1)(z+1) + a_2 \frac{4}{T^2}(z-1)^2} \quad (3.41)$$

Розкриття дужок та розташування за степенями  $z$  в чисельнику та знаменнику дає:

$$W(z) = \frac{b_0 - \frac{2b_1}{T} + \frac{4b_2}{T^2} + \left(2b_0 - \frac{8}{T^2}b_2\right)z + \left(b_0 + \frac{2}{T}b_1 + \frac{4}{T^2}b_2\right)z^2}{a_0 - \frac{2a_1}{T} + \frac{4a_2}{T^2} + \left(2a_0 - \frac{8}{T^2}a_2\right)z + \left(a_0 + \frac{2}{T}a_1 + \frac{4}{T^2}a_2\right)z^2} \quad (3.42)$$

Як видно з (3.42), вирази в чисельнику та знаменнику є цілком аналогічними.

Якщо тепер домножити чисельник та знаменник на  $\frac{1}{z^2}$ , то одержаний результат можна записати в формі  $z$ -передвальної функції з коефіцієнтами  $g_i$  і  $h_i$ :

$$W(z) = \frac{g_2 z^{-2} + g_1 z^{-1} + g_0}{h_2 z^{-2} + h_1 z^{-1} + h_0}. \quad (3.43)$$

Для коефіцієнтів чисельника маємо такі вирази:

$$\begin{aligned} g_2 &= b_0 - \frac{2b_1}{T} + \frac{4b_2}{T^2}; \\ g_1 &= 2b_0 - \frac{8}{T^2}b_2; \\ g_0 &= b_0 + \frac{2}{T}b_1 + \frac{4}{T^2}b_2 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Для коефіцієнтів знаменника  $h$  справедливими є аналогічні залежності, у яких  $a_i$  будуть стояти на місцях  $b_i$ . Цей результат (3.44) має важливе значення тому, що він справедливий для будь-якого  $n$ . Запишемо це в загальному вигляді:

$$\begin{aligned} g_i &= \sum_{j=0}^n k_{ij} \frac{b_j}{T^j}; i=0...n; \\ h_i &= \sum_{j=0}^n k_{ij} \frac{a_j}{T^j}; i=0...n. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Коефіцієнти  $K_{ij}$  можна поєднати в матрицю, яка буде такою:  
для  $n = 2$

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 2 & 0 & -8 \\ 1 & -2 & 4 \end{pmatrix}$$

для  $n=5$

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 8 & 16 & 32 \\ 5 & 6 & 4 & -8 & -48 & -160 \\ 10 & 4 & -8 & -16 & 32 & 320 \\ 5 & -6 & 4 & 8 & -48 & 160 \\ 1 & -2 & 4 & -8 & 16 & -32 \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

Таким чином,  $K$  — матриця коефіцієнтів розрахунку дискретної моделі за коефіцієнтами безперервної моделі "вхід-вихід". Розглянемо приклад застосування цього наближеного методу до передавальної функції ланки першого порядку

$$W(p) = \frac{10}{p+1}.$$

Вибравши інтервал квантування  $T=0,2$ , дістаємо за допомогою (3.44):

$$W(p) = \frac{10 + 20z^{-1} + 10z^{-2}}{11 + 2z^{-1} - 9z^{-2}}.$$

В  $z$ -передавальній функції маємо порядок  $n=2$ , в той час як система-оригінал має порядок  $n = 1$ . Однак порядок  $z$ -передавальної функції може бути знижений після обчислення нулів чисельника та



знаменника (полюсів). У даному випадку чисельник та знаменник мають спільний нуль:  $z^{-1} = -1$  і передавальна функція в скороченій формі (як результат розкладання полінома на множники) буде:

$$W(z) = \frac{10 + 10z^{-1}}{11 - 9z^{-1}}.$$

### 3.5. Вирішення дискретного диференціального рівняння, програма DWW

Рівняння (3.17) може бути вирішено безпосередньо ітераційним чисельним методом, для чого повинні бути задані:

значення вхідної величини  $u_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), що відповідає її зміні за часом;

початкові члени  $y_0, y_1, \dots, y_{n-1}$  вихідної послідовності, що відповідає початковим умовам  $y(0), y'(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$  для безперервної системи.

Якщо початкові члени вихідної послідовності вважати рівними нулю, а послідовність  $u_k$  заданою, то рівняння (3.17) можна вирішити відносно  $y_k$ :

$$y(k) = \frac{1}{h_0} \left( g_0 u_k + g_1 u_{k-1} + \dots + g_n u_{k-n} - h_1 y_{k-1} - h_2 y_{k-2} - \dots - h_n y_{k-n} \right) \quad (3.47)$$

Використавши 2-перетворення, одержимо це рівняння у такій формі:

$$y(z) = \frac{1}{h_0} \left[ \left( g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_n z^{-n} \right) u(z) - \left( h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_n z^{-n} \right) y(z) \right]. \quad (3.48)$$

Чергове значення вихідної послідовності  $y_k$  одержується у точці дискретизації  $k$  із значень  $u_k$  вхідної послідовності, що передують точці

k на 1,2,...,n позицій дискретизації, а також із відповідних передуючих значень вихідної послідовності  $y_{k-1}, \dots, y_n$ . Ці попередні значення керування та виходу мусять бути зафіксовані в пам'яті ЕОМ. При переході до наступної (k + 1) точки все відбувається аналогічно, одне, саме старе, значення стає непотрібним.

Якщо розглянути (3.48) у аспекті алгоритмізації та наступної програмної реалізації, то його можна записати по-іншому:

$$y = \frac{1}{h} [g_0 u + z^{-1}(g_1 u - h_1 y) + z^{-2}(g_2 u - h_2 y) + \dots + z^{-n}(g_n u - h_n y)] \quad (3.49)$$

Виконаємо у (3.49) перегрупування дужок приблизно таким чином, як це робиться за відомою схемою Горнера:

$$y = \frac{1}{h} [g_0 u + z^{-1} (g_1 u - h_1 y + z^{-1} (g_2 u - h_2 y + z^{-1} (g_3 u - h_3 y + z^{-1} (g_n u - h_n y)))))] \quad (3.50)$$

n дужок

Очевидно, що дискретне диференціальне рівняння у вигляді (3.50) досить легко вирішити за допомогою алгоритму, зображеного на рис.3.5, з урахуванням того, що множення на  $z^{-1}$  позначає затримку, на 1 такт, а змінні  $v_1, \dots, v_n$  є проміжними.

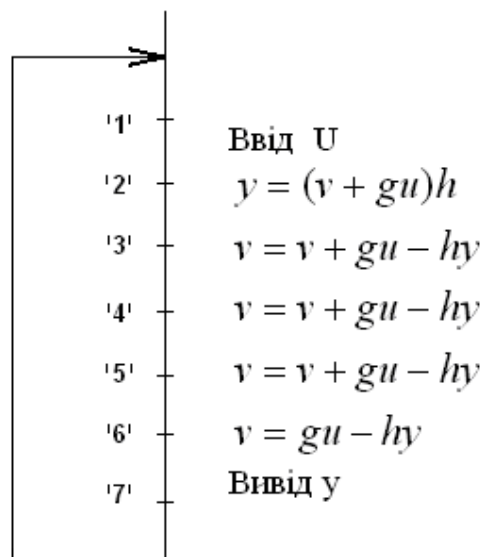


Рис.3.5. Алгоритм вирішення дискретного диференціального рівняння

Програма DWW (додаток) вирішення дискретних моделей у формі "вхід-вихід" дозволяє виконувати моделювання часових характеристик процесів, що задані  $p$ -передавальними функціями  $W(p)$ .

Розраховуються реакції на східчасті, синусоїдальні та випадкові вхідні діяння. Як вхідні дані програма дістає коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника.

Результати використання програми DWW повинні збігатися з тими, що одержуються за допомогою програми DRS, коли ми за допомогою вектор-рядка  $c^{-T}$  обираємо якийсь конкретний канал "вхід-вихід".

# АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

## Глава 1. Технологічні об'єкти керування (ТОК) і автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСКТП)

### 1.1. Основні поняття АСКТП

Системи автоматизованого керування, що створюються на основі найновіших наукових досягнень в області теорії керування, використовують економіко-математичні методи та високоефективну обчислювальну і керуючу техніку, одержали скорочене найменування АСКТП.

В АСКТП втілені всі основні досягнення попередніх ступенів розвитку засобів та методів керування технологічними об'єктами. Якісна відмінність керування, що реалізується АСКТП, забезпечується за рахунок системного підходу до вирішення цієї задачі та використання техніко-економічних критеріїв керування. Крім вирішення задач ефективного керування відповідним об'єктом, АСКТП є також джерелом об'єктивної, первинної, достовірної і своєчасної інформації для АСК вищих рівнів промислового виробництва.

Розглянемо спочатку деякі поняття та принципи, які покладені в основу організації АСКТП. Всяка система керування з точки зору технології її функціонування вирішує три основні задачі:

- 1) збір та передача інформації про керований об'єкт;
- 2) переробка інформації;
- 3) видача керуючих діянь на об'єкт керування.

АСК є так званою ергатичною системою "людина-машина", у котрій за людиною закріплена роль остаточного відбору рішень, які виробляються у системі, та надання їм юридичної сили. Істотне місце в АСКТП займають автоматичні пристрої і, передусім, засоби обчислювальної техніки. АСК може бути віднесена до класу АСКТП тільки тоді, коли виконується умова:

$$t_k \ll t_{T.П}$$

де  $t_k$  — інтервал часу поміж двома послідовними моментами вироблення керуючих діянь, а  $t_{T.П}$  — тривалість протікання технологічного процесу.

Роль і місце АСКТП в ієрархічній структурі сучасного хімічного виробництва можна визначити із аналізу рис. 1.1.

Найнижчу ступінь ієрархічної структури утворюють типові процеси хімічної технології у певнім апаратурнім оформленні та локальні системи автоматичного

регулювання (САР). Основу другого ступеня ієрархії хімічного виробництва становлять технологічні агрегати, установки та ін., керовані за допомогою АСКТП. На цьому рівні розглядається взаємозв'язана сукупність окремих типових технологічних процесів (на рис. 1.1 зображено  $N$  таких сукупностей). Третій, вищий ступінь ієрархії, — це системи оперативного керування цехами, системи організації виробництва, планування запасів сировини, реалізації готової продукції та ін. Такі системи одержали назву автоматизованих систем керування виробництвом (АСКВ).

Таким чином, призначення АСКТП у головному може бути визначено як цілеспрямоване провадження технологічного процесу при високоінтенсивних та економічних режимах використання устаткування, а також забезпечення необхідною інформацією суміжних та вищих за ієрархією систем керування. Створення кожної АСКТП передбачає одержання цілком визначених техніко-економічних результатів: зниження собівартості продукції, зменшення затрат, підвищення продуктивності агрегатів та якості цільового продукту та ін. Тому після визначення призначення АСКТП необхідно чітко конкретизувати цілі функціонування системи. Для промислових об'єктів хіміко-технологічного профілю можна зазначити такі цілі: забезпечення безг пеки їх функціонування; одержання заданих параметрів вихідних продуктів; оптимізація режиму роботи об'єкта; погодження режимів роботи устаткування.

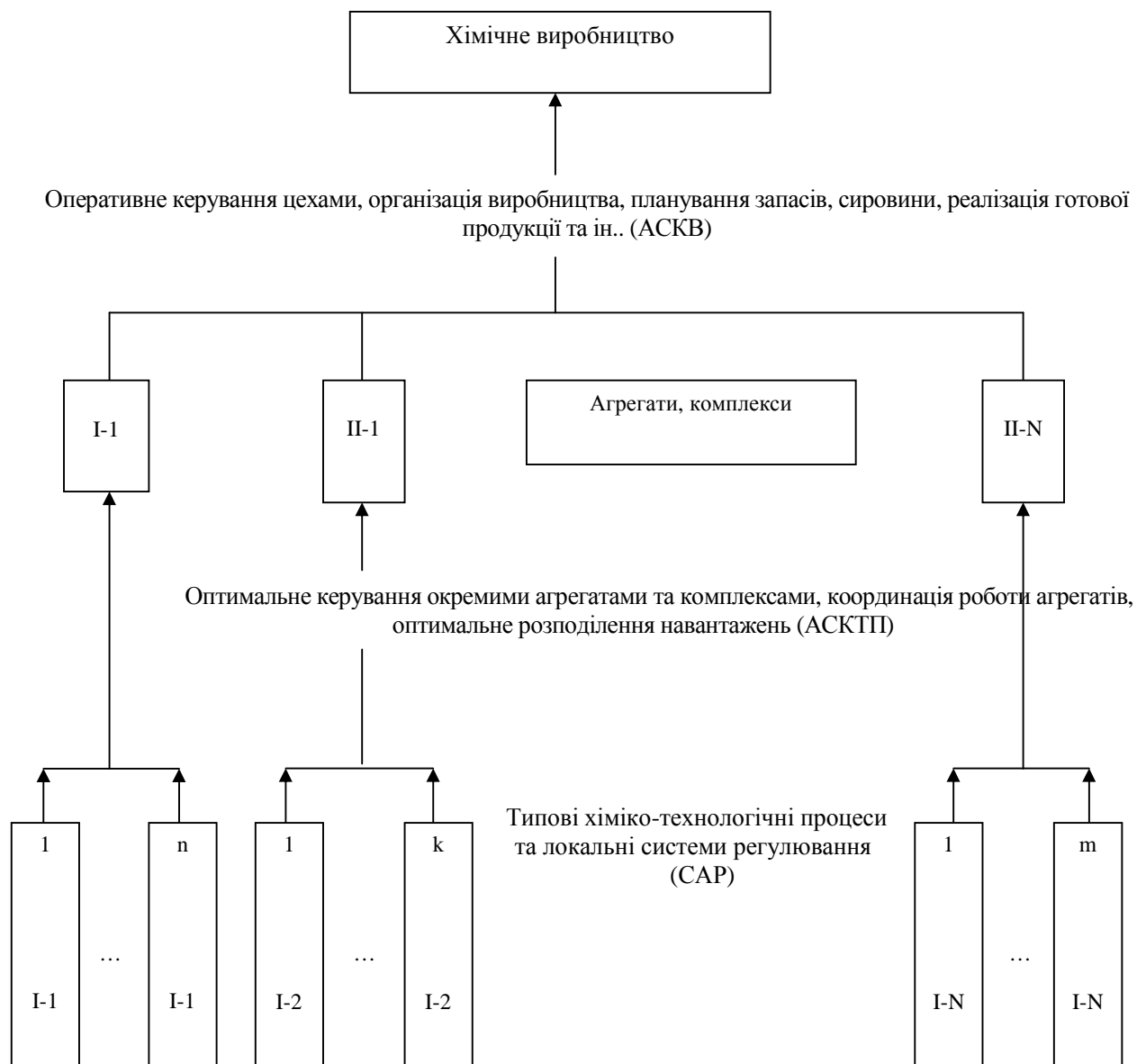


Рис. 1.1. Ієрархічна структура хімічного виробництва

Міру досягнення поставлених цілей характеризують за допомогою так званого критерію керування, тобто показника, що достатньо повно характеризує якість провадження технологічного процесу і отримує числові значення залежно від вироблюваних системою керуючих діянь. В математичній формі критерій керування конкретизує цілі створення даної системи. Одна із загальних постанов питання про критерій керування зводиться до намагання одержати найбільший економічний ефект, який визначається різницею вартостей отримуваної готової продукції та сировини, енергії, робочої сили та інших затрат. Оптимальним буде таке керування, яке дозволить цій різниці досягти максимальної величини. Велику роль відіграють

також обмежена, яких повинні дотримуватися при виборі керуючих діянь. Обмеження можуть бути фізичними, які не можуть порушуватися навіть при помилковому виборі керуючих діянь, та технологічними, які можуть порушуватися, але їхнє порушення призводить до втрат.

Функція АСКТП — це сукупність діянь системи, спрямованих на досягнення цілі керування. При цьому під терміном "функція АСКТП" розуміють таку завершену, в загальному випадку, функцію системи "людина-машина", яка проявляється поза неї і тому має певну споживчу цінність.

Розпізнають інформаційні та керуючі функції АСКТП. До інформаційних відносяться такі функції АСКТП, результатом виконання яких є надання оператору системи або якомусь зовнішньому адресату інформації про хід керованого процесу. Характерними прикладами таких функцій є :

- контроль за основними параметрами, тобто безперервна перевірка відповідності параметрів процесу їх допустимим значенням та негайне інформування персоналу при виникненні невідповідності;

- вимірювання або реєстрація за викликом оператора тих параметрів процесу, які його цікавлять;
- інформування оператора (за його запитанням) про виробничу ситуацію, яка існує в даний момент на тій чи іншій ділянці об'єкта керування;

- фіксація періоду відхилення деяких параметрів процесу за допустимі межі;

- обчислення за викликом оператора деяких комплексних показників, які характеризують якість продукції або інші важливі показники, але не піддаються безпосередньому вимірюванню;

- обчислення досягнутих техніко-економічних показників роботи об'єкта керування;

- періодична реєстрація вимірюваних параметрів та обчислюваних показників;

- виявлення та сигналізація про появу небезпечних (перед-аварійних, аварійних) ситуацій.

Керуючі функції АСКТП включають дії з вироблення та реалізації керуючих діянь на об'єкті керування. До основних керуючих функцій відносяться:

- стабілізація змінни-: технологічного процесу на деяких постійних значеннях, які

визначаються регламентом виробництва;

програмна зміна режиму процесу за заздалегідь заданим законам; захист устаткування від аварій;

формування та. реалізація керуючих діянь, які забезпечують досягнення або дотримання режиму оптимального за технологічним або техніко-економічним критерієм;

розподіл матеріальних потоків та навантажень між технологічними агрегатами;

керування пусками та зупинками технологічного устаткування.

Найважливішими компонентами АСКТП є її забезпечення: інформаційне, організаційне, програмне та технічне. Розробка програмного забезпечення проводиться на основі математичного забезпечення, яке до складу АСКТП не входить. В деяких класифікаціях виділяють також лінгвістичне та юридичне забезпечення.

## 1.2. Технологічні об'єкти керування в процесах переробки газових сумішей

Під технологічним об'єктом керування (ТОК слід розуміти всю установку, ділянку, відділення, цех, виробництво та ін. або ту їх частину, керування якою передбачається автоматизувати.

Розглянемо технологію переробки газових сумішей. На рис. 1.2 показано три типові стадії такої технології.

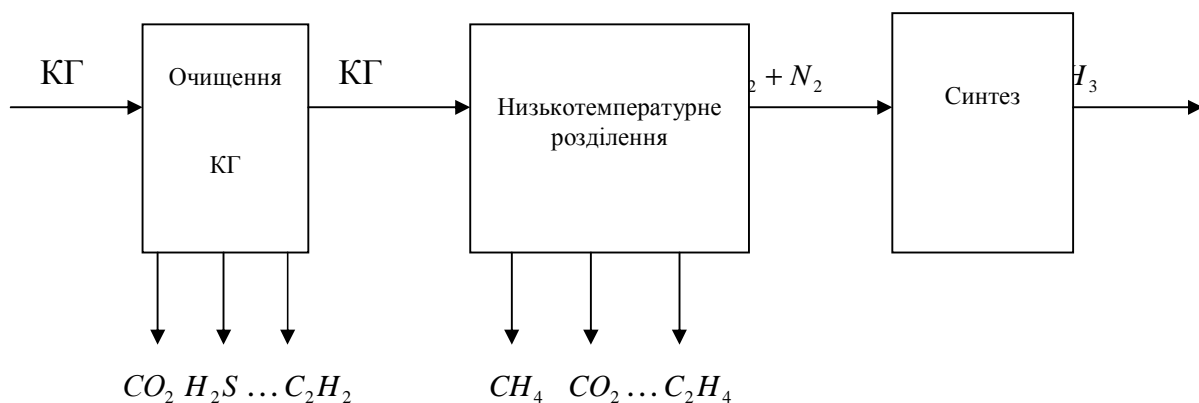




Рис. 1.2. Стадії виробництва аміаку з КГ

Як сировина використовується коксовий газ (КГ) — побічний продукт, який виникає в процесі коксування вугілля при виробництві металу в домнах.

На першій стадії виконується очищення КГ шляхом хімічного зв'язування впроваджуваних компонентів:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  та ін.

На другій стадії здійснюється низькотемпературне розділення КГ (відділення етилену, пропілену, метану, оксиду вуглецю) з метою здобуття водню.

На третій стадії проводиться синтез аміаку з азотоводневої суміші.

Головними особливостями стадії очищення є такі:

послідовне включення технологічних схем очищення КГ, що дозволяє розглядати роботу окремих вузлів як незалежних один від одного;

наявність різних за природою фізико-хімічних процесів, що потребує розробки математичних моделей та алгоритмів керування для кожного з них.

Аналіз роботи стадії очищення дозволяє виділити два технологічних вузли: вузол очищення від бензолу та нафталіну (рис. 1.3) і вузол очищення від діоксиду вуглецю та сірководню (рис. 1.4). До складу останнього входить колона промивки КГ аміачним розчинами та колона регенерації.

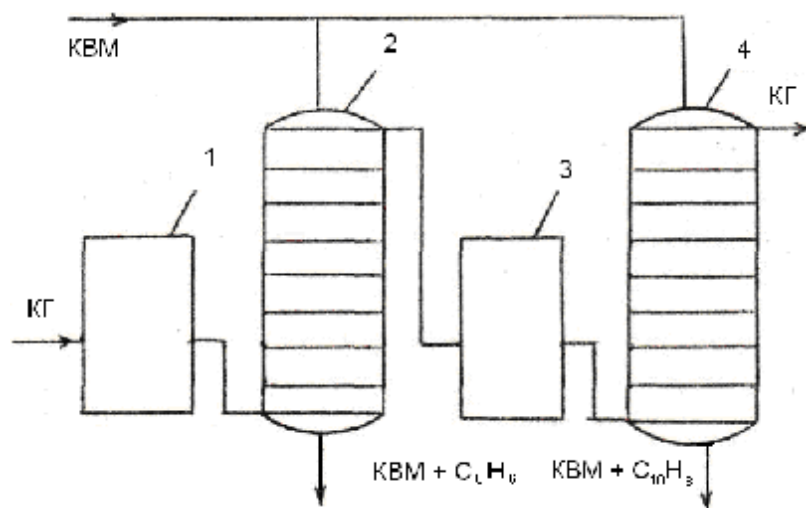


Рис. 1.3. Вузол очищення від бензолу та нафталіну: 1,3 — перший та другий ступені компресора; 2 — колона очищення від бензолу; 4 — колона денафталізації;

КВМ — кам'яновугільне масло

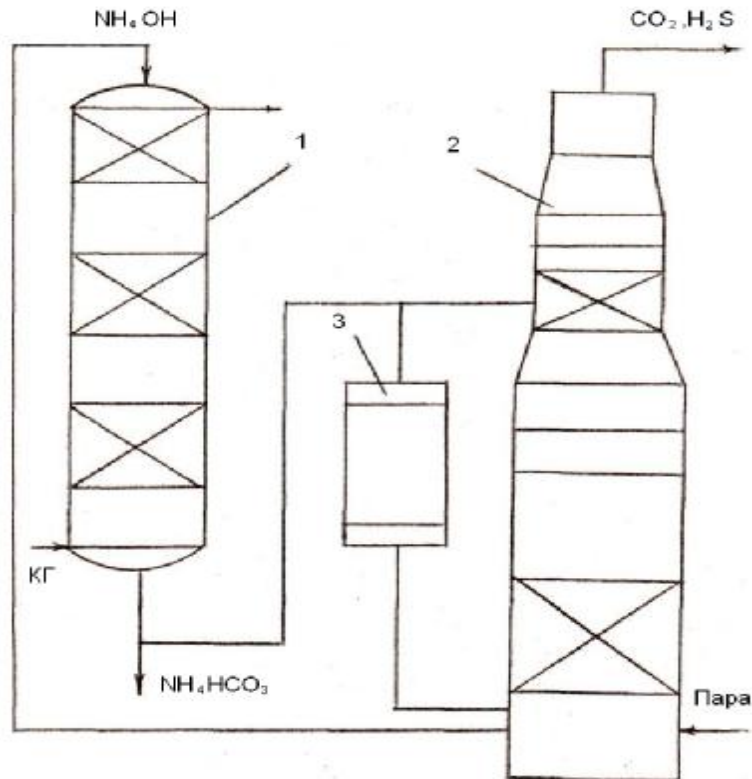


Рис. 1.4. Вузол очищення від діоксиду вуглецю та сірководню: 1 — колона промивання КГ аміачними розчинами; 2 — колона регенерації; 3 — теплообмінник

Відповідно до розглянутих вище (див. ч. 1, гл. 1) заходів на рис. 1.5, 1.6, 1.7 показані групи параметрів, які характеризують ці технологічні вузли як ТОК.

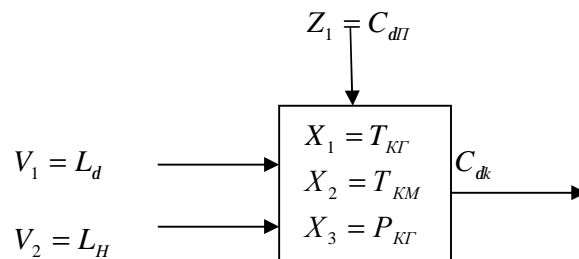


Рис. 1.5. Групи параметрів, що визначають вузол очищення КГ від бензолу та нафталіну:  $C_{дл}$ ,  $C_{dk}$  — початкова та кінцева концентрації бензолу у КГ на вході та виході колон де-бензоляції і денафталізації;  $L_d$ ,  $L_H$  — витрати кам'яновугільного масла на колони дебензоляції та денафталізації;  $T_{кг}$ ,  $T_{км}$  — температури КГ та КВМ;  $P_{кг}$  — тиск КГ

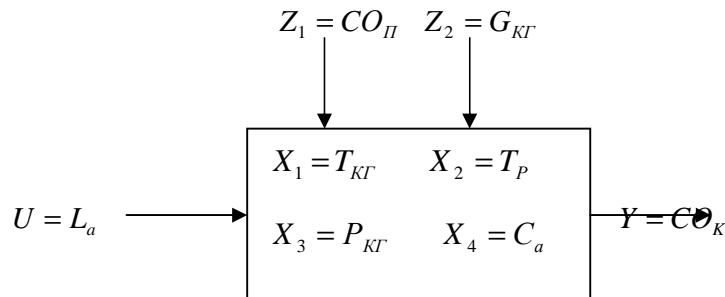


Рис. 1.6. Групи параметрів, що визначають колону промивання КГ<sub>#</sub> аміачними розчинами: СО<sub>П</sub>, СО<sub>К</sub> — початкова та кінцева-концентрації діоксиду вуглецю у КГ на вході та виході; L<sub>a</sub> — витрата аміачного розчину; C<sub>a</sub> — концентрація вільного аміаку у розчині; P<sub>КГ</sub> — тиск КГ; T<sub>КГ</sub>, T<sub>р</sub> — температури КГ та розчину; G<sub>хг</sub> — витрата КГ на вході

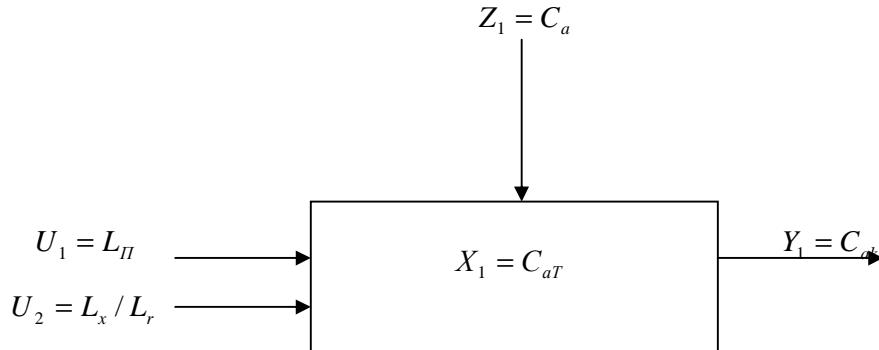


Рис. 1.7. Групи параметрів, що визначають колону регенерації: L<sub>П</sub> — витрата пари у колону; L<sub>х</sub> / L<sub>р</sub> — співвідношення потоків холодної та гарячої складових карбонатного розчину; C<sub>a</sub> — концентрація вільного аміаку у розчині, що входить у колону; C<sub>aT</sub> — концентрація вільного аміаку у колоні; C<sub>ак</sub> — концентрація вільного аміаку у розчині, що виходить з колони



Рис.1.8. Цикл азоту

Ціль керування полягає у підтримці на потрібних рівнях значень концентрацій деяких компонентів газових сумішей. За своїм змістом процеси стадії очищення належать до абсорбційно-десорбційних: фізична абсорбція, хемосорбція, десорбція продуктів реакції.

Технологічна схема стадії розділення КГ може бути за своїм функціональним призначенням подана в вигляді двох циклів: цикл азоту (рис.1.8) та цикл КГ (рис. 1.9).

Цикл азоту забезпечує холодильну потужність агрегату розділення і постачає азот для дозування синтез-газу до потрібного співвідношення. Цикл азоту функціонує таким чином (див. рис. 1.8).

Азот високого тиску (АВТ) після компресора К (180 ат.) розподіляється на дві частини. Одна частина охолоджується в аміачному випарнику Р ( $G_g, -40^{\circ}\text{C}$ ), детандується у детандері Д (1,2 Ат,  $-163^{\circ}\text{C}$ ) та потрапляє як основний холодоагент у теплообмінник L охолодження АВТ. Друга частина ( $G_{ABT}$ ) надходить у систему паралельних рекуперативних теплообмінників L], Ц, де охолоджується до  $T_3 (-130 \dots -160^{\circ}\text{C})$  протитоком детандованого азоту та азотоводневої суміші (АВС), яка виходить з абсорбційної колони. Ціллю керування вузлом є підтримка на потрібному рівні значень температури ( $T_3$ ) та витрати  $G_3$ ) АВТ. Групи параметрів, що визначають цей вузол як ТОК, показані на рис. 1.10.

У циклі коксового газу (див.рис.1.9) реалізується, власне, процес розділення КГ, який умовно можна уявити як такий, що виконується в два етапи.

Перший етап: КГ, який надходить з відділення очищення, потрапляє до системи теплообмінників - конденсаторів (L), де: відбувається конденсація більшої частини етиленових сполук (етиле-; нова фракція) охолодженням до температури  $-145^{\circ}\text{C} \dots -130^{\circ}\text{C}$ . Зворотний потік прямує через ємкість (4) і дросель Д1. Далі КГ потрапляє до трубного простору теплообмінника (3), в міжтрубному просторі якого кипить рідкий азот (температура  $-195^{\circ}\text{C}$ ). Тут КГ охолоджується до  $-185^{\circ}\text{C} \dots -190^{\circ}\text{C}$  і відбувається конденсація метану та більшої частини оксиду вуглецю. Зворотний потік —  $G_1 (N_2 + CO + CH_4)$ , цей конденсат називається залишковою фракцією.

Другий етап: виведення залишків оксиду вуглецю промиванням' рідким азотом

(вихідний продукт циклу азоту) в абсорбційній колоні 2. Наверху колони буде суміш водню та азоту, яка містить оксид вуглецю у концентрації, не більшій, ніж задана (15 ррга). Унизу колони — рідкий залишок (суміш оксиду вуглецю та азоту). Зворотний потік ( $N_2 + CO$ ) дроселюється дроселем Д2 і підключається до потоку G1.

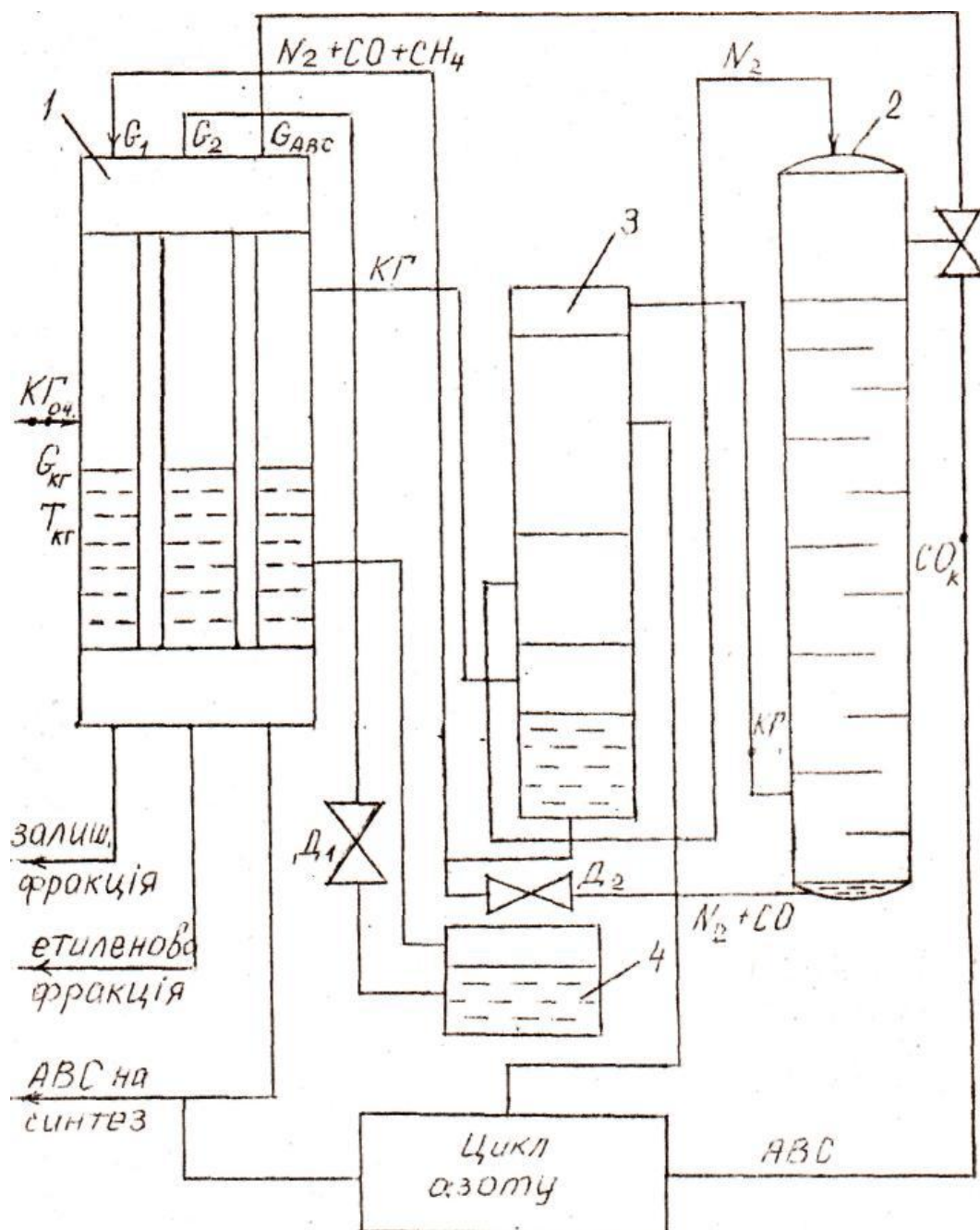


Рис. 2.1. Цикл коксового газу

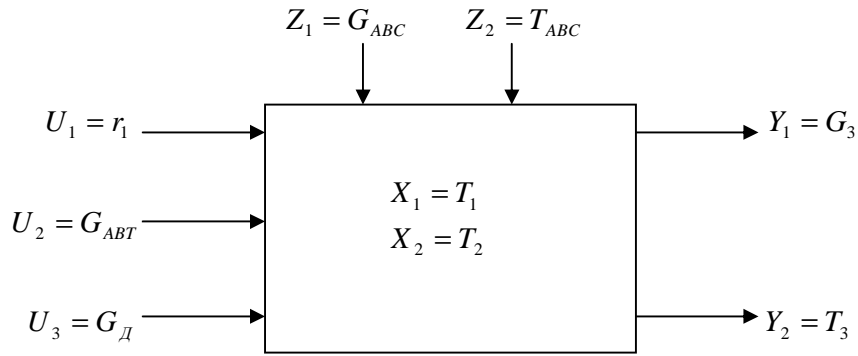


Рис. 1.10. Групи параметрів, що визначають цикл азоту

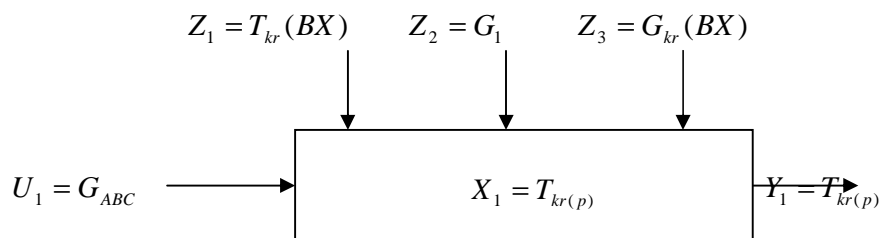


Рис. 1.11 Групи параметрів, що визначають температуру КГ на виході з теплообмінника-конденсатора:  $G_1$  — витрата  $N_2 + CO + ' + CH_4$ ;  $G_{ABC}$  — витрата ABC після колони (2);  $T_{kr(p)}$  — температура КГ на виході з теплообмінника-конденсатора (1)

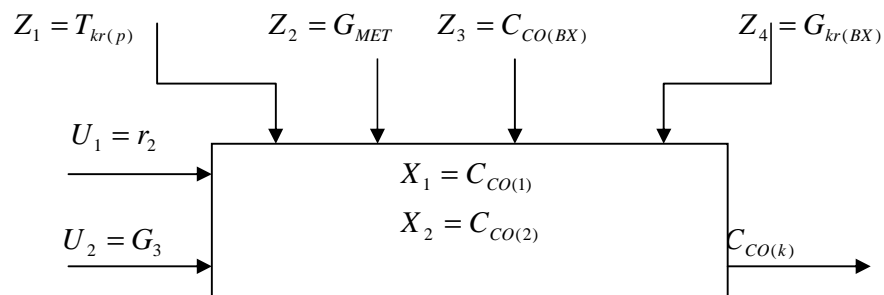


Рис.1.12 Групи параметрів, що визначають якість ABC:  $C_{CO(1)}$  — компонента концентрації оксиду вуглецю у ABC, що визначається зміною режиму роботи теплообмінника (3);  $C_{CO(2)}$  — компонента концентрації оксиду вуглецю у ABC, що визначається зміною витрати азоту на абсорбер (2);  $G_2$  — відношення величини потоку  $Б_{ж}$  на теплообмінник (3) до загального потоку  $O_3$

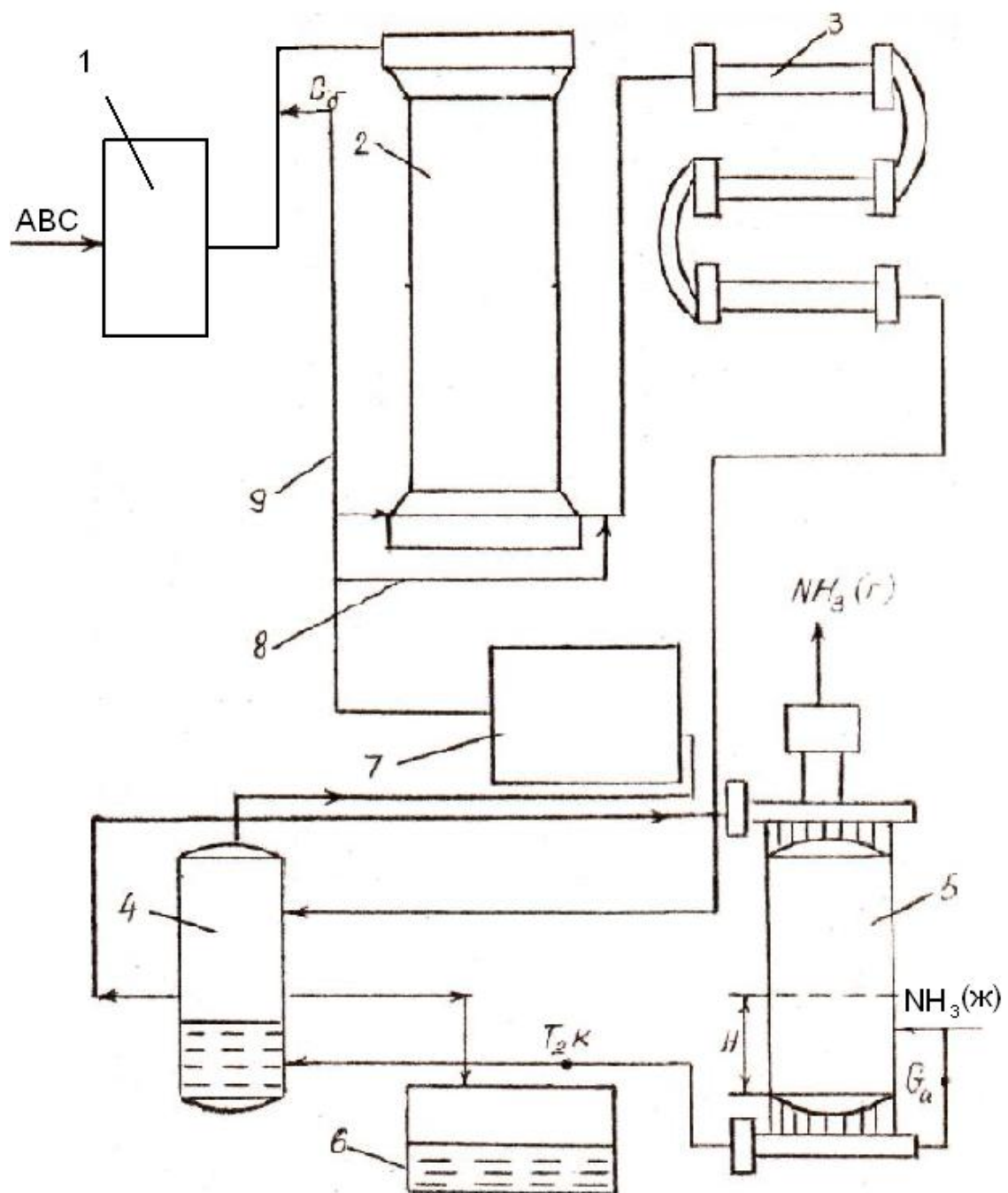


Рис. 1.13. Спрощена функціональна схема агрегату синтезу аміаку



У циклі КГ визначимо два ТОК, які зображені на рис.1.11, 1.12. Ціль керування першим об'єктом (див. рис.1.11) — підтримка заданої температури КГ( $T_{кг(p)}$ ) на виході з теплообмінника — конденсатора (1), який забезпечує повну конденсацію етиленової фракції (вихідний напівпродукт). Ціль керування другим ТОК — забезпечення виконання обмежень на концентрацію оксиду вуглецю ( $C_{со(к)}$ ) на виході колони абсорбції (2), що, по суті, і визначає якість азотоводневої суміші, яка надходить на стадію синтезу.

Головним вузлом стадії синтезу є агрегат синтезу аміаку. На рисі.13 зображено його спрощену функціональну схему.

Свіжа АВС після компримювання (1) надходить у колону синтезу (2), де при тиску 250...300 атм. і температурі 450...500°C протікає реакція синтезу аміаку. Керування температурним режимом колони здійснюється за допомогою байпасів (8,9). Байпас (9) призначений для подання газу безпосередньо в зону реакції, байпас (8) — для подання газу повз колону, він відчиняється при значному спаді навантаження по АВС. Циркуляційний газ, що виходить з колони (2) з температурою 180...250°C, потрапляє в апарати, призначені для охолодження суміші та відокремлення аміаку.

У водяному холодильнику (3) температура газу знижується до 30...40°C, а у верхній частині колони конденсації (4) — до 15...25°C. Кінцева ланка охолодження — аміачний випарник (5), де циркуляційний газ, що йде по трубах, охолоджується рідким аміаком (частиною готового продукту), який кипить у міжтрубному просторі. Потім газ подається в нижню частину колони (4), де з нього відокремлюється аміак, який відводиться у збірник готового продукту.

Циркуляційний газ проходить через центробіжний компресор (7), розводиться свіжою сумішшю і знову надходить до колони синтезу. Газоподібний аміак, що виходить із випарника, використовується для виготовлення другого готового продукту — слабкої аміачної води.

У відділенні синтезу виділимо такі два ТОК: температура повторної конденсації аміаку і температура в зоні реакції колони синтезу (рисі.14 та 1.15). Ціль керування першим — максимізація випуску рідкого аміаку, другим - стабілізація

температури у каталізаторній коробці колони синтезу (2).

### 1.3. Класифікація АСКТП

Підсистема АСКТП — це частина системи, виділена за функціональною або структурною ознакою. Функціональна ознака дозволяє ділити систему, наприклад, на керуючу та інформаційну підсистеми або ряд підсистем відповідно до цілей АСКТП.

Структурна ознака дозволяє розподілити АСКТП на підсистеми, які забезпечують керування частиною об'єкта або відповідні самостійним частинам комплексу технічних засобів.

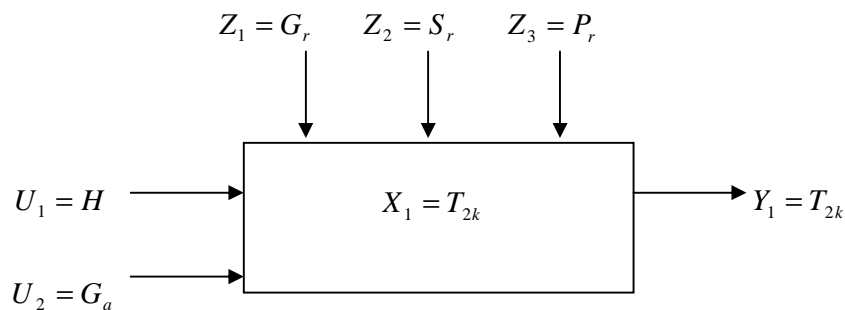


Рис.1.14. Групи параметрів, що визначають температуру повторної конденсації аміаку:  $H$  — рівень у аміачному випарнику;  $G_a$  — витрата рідкого аміаку;  $G_r$  — витрата суміші на колону;  $S_r$  — склад суміші;  $P_r$  — тиск аміаку;  $T_{2k}$  — температура повторної конденсації аміаку

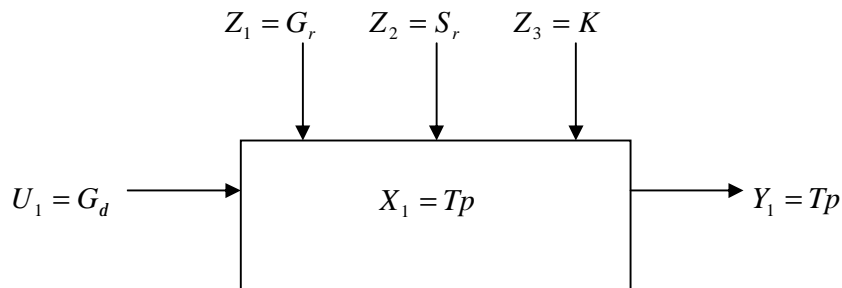


Рис.1.15. Групи параметрів, що визначають температуру у зоні реакції колони синтезу:  $K$  — стан каталізатора;  $G_d$  — витрата газу через холодний байпас;  $T_p$  — температура у зоні реакції

Враховуючи досить широку різноманітність сучасних АСКТП, виникає задача вибору систем-аналогів, тобто таких систем, які в тому чи іншому відношенні є близькими до розроблюваної. Зазначимо основні характеристики, які доцільно враховувати при розподіленні АСКТП на класи:

- основні інформаційні функції;
- основні функції керування;
- спосіб керування об'єктом та режим роботи ЕОМ;
- показчик умовної інформаційної потужності ТОК;
- характер протікання керованого технологічного процесу.

В кожній характеристиці розрізняються такі ознаки.

1. Для основних інформаційних функцій:

- 1 – збирання, первинна переробка та зберігання технологічної інформації, непряме вимірювання параметрів технологічного процесу, сигналізація стану параметрів технологічного процесу, розрахунок техніко-економічних показників, підготовка інформації для інших систем, реєстрація параметрів керованого процесу;
- 2 – контроль і реєстрація відхилень параметрів процесу;
- 3 – аналіз блокувань та захистів, які спрацювали;
- 4 – діагностика та прогнозування перебігу процесу;
- 5 – діагностика технічних засобів;
- 6 – оперативне відображення та рекомендації з ведення процесу;

автоматичний обмін з системою вищого рівня.

2. Для основних функцій керування:

- 1 – регулювання окремих технологічних параметрів;
- 2 – однократне логічне керування;
- 3 – каскадне регулювання;

- 4 – багатозв'язкове регулювання;
  - 5 – виконання програмних та логічних операцій дискретного керування;
  - 6 – оптимальне керування стаціонарними режимами;
  - 7 – оптимальне керування динамічними режимами;
  - 8 – оптимальне адаптивне керування.
3. Для основних засобів керування об'єктом та режимів роботи ЕОМ:
- 1 – керування здійснюється оператором, інформаційно-радниць-кий режим;
  - 2 – комбіноване керування, режим централізованого керування пристроями локальної автоматики;
  - 3 – пряме цифрове регулювання, режим централізованого керування виконавчими пристроями;
  - 4 – аналого-цифрове (гібридне) керування, режим централізованого керування виконавчими пристроями.
4. Для показника умовної інформаційної потужності (кількості точок контролю та керування):
- 01 — до 150 точок; 02 — до 250; 03 — до 350; 04 — до 450;
- 05 — до 550; 06 — до 650; 07 — до 750; 08 — до 850; 09 — до 950; 10 — до 1500; 20 — до 2500; 30 — до 3500; 40 — до 4500;
- 50 — до 5500; 60 - до 6500; 70 — до 7500; 80 — до 8500; 90 — до 9500; 99 — до 10050 точок.
5. Для характеру протікання керованого технологічного процесу:
- 0 – безперервний процес з безперервними потоками матеріалів та енергії;
  - 1 – безперервний процес з перервними потоками матеріалів та енергії;
  - 2 – перервний (дискретний) процес з перервними потоками матеріалів та енергії.

Перші дві характеристики відбивають ступінь функціонального розвитку АСКТП відносно інформаційних та керуючих процедур. Рівень автоматизації інформаційних та керуючих процесів знаходить своє відображення в третій характеристиці.

Оцінкою інформаційної потужності найчастіше є кількість технологічних та виробничих змінних, що вимірюються або контролюються системою.

Тип технологічного процесу визначається тривалістю перебування його в неусталеному (перехідному) та усталеному станах. За цією ознакою всі технологічні процеси можна поділити на три класи: дискретні, безперервні і безперервно-дискретні. Приклад класифікатора, який базується на розглянутих характеристиках, показаний на рис. 1.16.

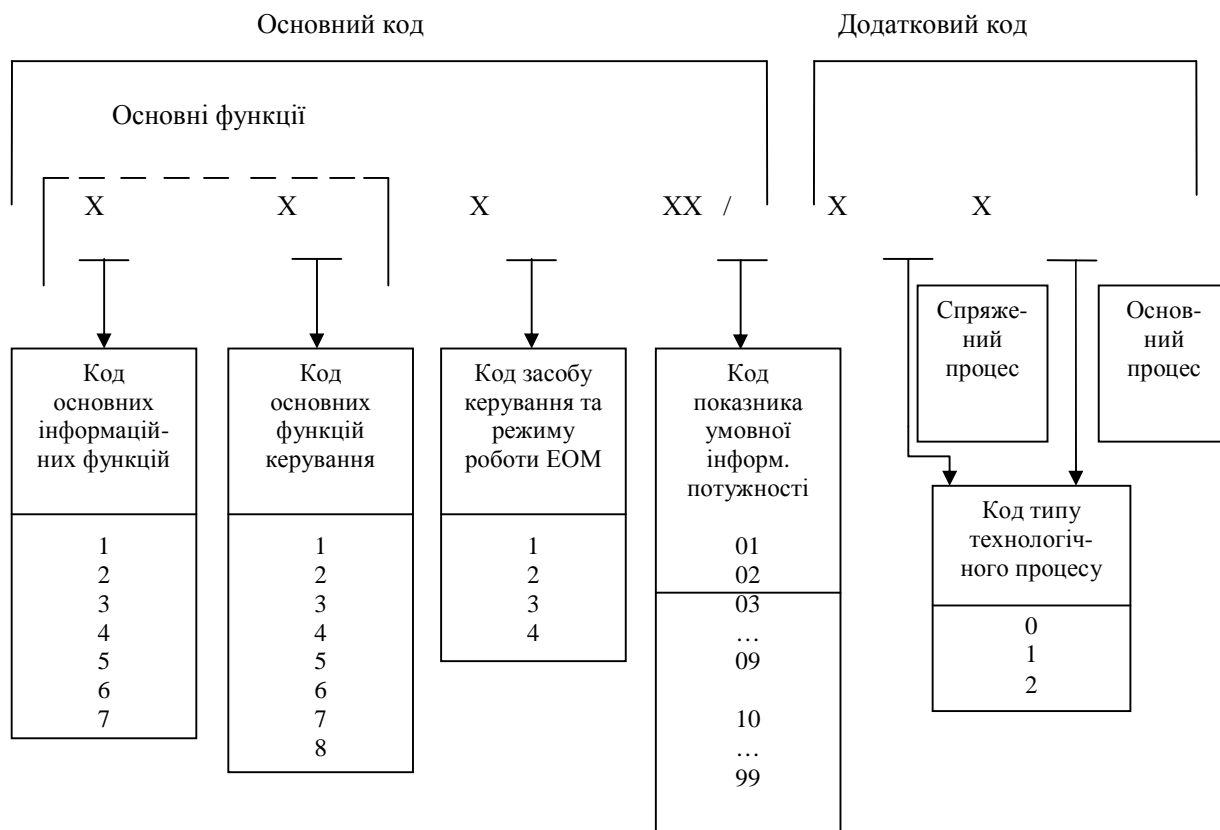


Рис. 1.16. Класифікатор АСКТП

Класифікація АСКТП за запропонованими ознаками дозволяє, кожній системі присвоїти власний код, тобто віднести її до відповідних груп систем. Наприклад, АСКТП 46.2.02/02 означає систему з інформаційними функціями, які забезпечують діагностику та прогнозування ходу процесу, а також діагностику стану устаткування; з оптимальним керуванням усталеним режимом технологічного процесу; з комбінованим керуванням при інформаційній потужності до 250 точок контролю та керування. Основним процесом є дискретний з перервними матеріальними потоками.

## Глава 2. Передпроектні стадії розробки АСКТП

### 2.1. Методологія проектування АСКТП

В загальному вигляді задачу проектування АСКТП можна відобразити схемою (рис.2.1).

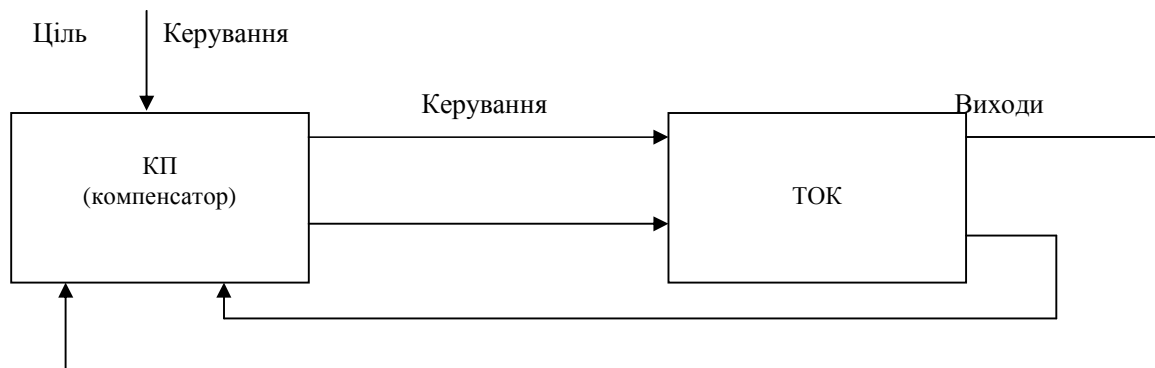


Рис.2.1. Замкнена система керування

Тут керуючий пристрій (КП) або компенсатор — пристрій, який компенсує відхилення параметрів об'єкта від бажаних. Головною задачею проектувальників АСКТП є розробка для даного ТОК такого КП, який забезпечив би задану якість системи керування. Слід зазначити, що ця задача за існуючим рівнем розвитку технічних засобів систем керування виявляється скоріше математичною, результат її вирішення — це не проектні креслення, а алгоритми і програми функціонування КП.

Розвиток розробок АСКТП в нашій країні відбувався шляхом поступового переходу від інтуїтивних до формалізованих підходів при вирішенні задачі: на базі

існуючих технічних засобів автоматизації побудувати для даного об'єкта ефективну з економічного боку людино-машинну систему керування, яка відповідала б заданим цілям та вимогам [20]. Остаточне вироблення формалізованого підходу до процесу проектування АСКТП збігається за часом із засвоюванням та упровадженням у серійне виробництво ЕОМ третього покоління, в яких використовуються інтегральні мікросхеми, агрегатний та модульний принципи побудови, здатність працювати в режимі реального часу. В той період (близько середини 70-х років) були введені в дію основні нормативні документи — ГОСТ і дещо пізніше (початок 80-х років) їх розгорнуте тлумачення — "Общепромышленные руководящие методические материалы (ОРММ)". Серед ГОСТ на АСКТП основними є:

ГОСТ 16084-75: Основні положення;

ГОСТ 17195-74: Терміни та визначення;

ГОСТ 17195-76: Загальні технічні вимоги;

ГОСТ 20913-75: Стадії створення.

Весь процес створення АСКТП згідно з ГОСТ та ОРММ розподіляється на шість стадій:

дві передпроектні — "Техніко-економічне обґрунтування" (ТЕО) та "Технічне завдання" (ТЗ);

дві проектні — "Технічний проект" (ТП) та "Робочий проект" (РП);

**Примітка.** Ці стадії допускається іноді з'єднувати в одну — "Тех-норобочий проект".

дві стадії реалізації — "Запровадження в дію" та "Аналіз функціонування".

Кожна стадія створення АСКТП розподіляється на етапи у відповідності із змістом конкретних робіт. Розглянемо стадії та етапи дещо докладніше.

Основна ціль робіт, що виконуються на стадії ТЕО, полягає в формуванні обґрунтованих пропозицій замовника щодо створення АСКТП з визначеними функціями та технічними характеристиками. Розробка ТЕО проводиться замовником системи спільно з генеральною проектною організацією; при необхідності до робіт залучаються спеціалізовані організації, зокрема передбачений

розробник системи (виконавець). Розробка ТЕО в загальному випадку вміщує три етапи:

- 1) організація розробки ТЕО;
- 2) обстеження об'єкта та існуючої системи керування;
- 3) встановлення функціонального призначення і оцінка ефективності АСКТП, розробка якої передбачається.

Основні результати робіт оформляються у вигляді підсумкового документа "Техніко-економічне обґрунтування створення АСКТП". В цьому документі повинні бути чітко зазначені функції АСКТП, що створюється, а також вимоги до якості їх виконання (наприклад, за швидкістю, метрологічними характеристиками, надійністю та ін.). Тут же повинен бути наданий розрахунок очікуваних показників економічної ефективності АСКТП.

На стадії ТЗ повинна бути підтверджена на основі об'єктивних даних наукового аналізу доцільність і детально обґрунтована можливість створення АСКТП з тими функціями та характеристиками, які були зазначені в ТЕО. Розробку ТЗ здійснює виконавець — основний розробник системи. За нормативними документами в стадію ТЗ включено єдиний етап: передпроектні науково-дослідні роботи (НДР). Однак через те, що цей етап є дуже важливим і великим, є сенс виділити такі обов'язкові види передпроектних робіт на стадії ТЗ.

1. Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування.
2. Аналіз інформаційних потоків; формулювання критерію керування та визначення обмежень.
3. Розробка попередніх математичних модулів технологічного процесу та вимірювань.
4. Ідентифікація моделей за даними експерименту.
5. Формулювання задач синтезу алгоритмів контролю та керування, а також поперечний вибір методів їх вирішення.
6. Формулювання постановок функціональних задач системи.
7. Попередній вибір технічних засобів системи.



Основний документ стадії — "Технічне завдання на створення АСКТП". За цим документом здійснюється перевірка системи при переданні її до промислової експлуатації. Крім цього документа, як правило, на стадії ТЗ випускається науково-технічний звіт (звіти), який містить результати передпроектних НДР.

Ціллю робіт, які виконуються на стадії ТП, є обґрунтування і розробка основних технічних рішень. Основою для виконання робіт є наявність затвердженого ТЗ на створення системи. ТП виконується основним (генеральним) розробником системи, як співвиконавець може використовуватися проектна організація. Вихідні матеріали для стадії технічного проектування — ТЗ, ТЕО, науково-технічний звіт про результати передпроектних НДР.

Основні етапи робіт стадії:

1. Системотехнічний синтез АСКТП. На цьому етапі проробляються основні рішення по системі в цілому — її алгоритм функціонування (або алгоритмічна структура).

2. Технічне проектування спеціального математичного та інформаційного забезпечень АСКТП. За змістом цей етап становить основну сукупність робіт, які виконує генеральний розробник системи по створенню всіх алгоритмів, що реалізуються засобами обчислювальної техніки.

Крім цих основних виконуються також роботи з ряду інших етапів, серед яких — "Апаратурно-технічний синтез", "Розробка завдань на проектування в суміжних частинах проекту", "Підготовка заявок на розробку нових засобів автоматизації та технічних завдань на оперативно-диспетчерське обладнання, що не виробляється серійно". Документація стадії ТП розподіляється на загальносистемну, математичного, інформаційного та технічного забезпечень. Це велика документація, яка містить в собі пояснювальні записки, схеми функціональної та організаційної структур, описи різних алгоритмів, переліки вхідних та вихідних сигналів, а також завдання на програмування — важливий документ для наступної стадії проектування.

На стадії РП повинні бути вироблені робочі рішення за системою. Головним етапом РП є створення робочої документації програмного та інформаційного

забезпечень. Обов'язкові види проектних робіт:

1. Синтез повної програмної структури системи.
2. Аналіз синтезованої структури з метою виділення програмних модулів, які підлягають безпосередньому програмуванню та виготовленню у вигляді окремих програм.
3. Програмування, налагодження та перевірка модулів.
4. Виготовлення програм-оригіналів, дублікатів та копій.
5. Розробка і оформлення програмної та експлуатаційної документації.

Ціллю робіт на стадії "Запровадження в дію" є фізична реалізація системи та передача її до промислової експлуатації. Основні етапи робіт:

- 1) підготовка об'єкта до запровадження АСКТП;
- 2) налагодження та випробування системи;
- 3) дослідна експлуатація;
- 4) приймально-здавальні випробування.

З документації цієї стадії найбільш важливими є: програма та методика проведення приймально-здавальних випробувань; акт, який складається після закінчення приймально-здавальних випробувань, в ньому містяться висновки про відповідність (невідповідність) АСКТП вимогам, що пред'являються до неї, а також доцільність (недоцільність) передачі її до промислової експлуатації; експлуатаційна документація.

Остання стадія в розробці АСКТП — "Аналіз функціонування" — складається із здобуття об'єктивних і систематизованих даних про якість створеної системи та про реальний ефект від її використання на підставі досвіду її промислової експлуатації. Основними етапами робіт є такі:

- 1) попереднє обстеження стану АСКТП;
- 2) експериментально—статистичне дослідження та аналіз одержаних результатів;
- 3) розробка рекомендацій та заключних матеріалів дослідження. Основний підсумковий документ стадії — зведений науково-технічний звіт про результати аналізу функціонування.

## 2.2. Методика техніко-економічного аналізу ТОК

Створення АСКТП, до складу якої входить комплекс технічних засобів, системи збирання і переробки інформації, відповідні види забезпечень, а також висококваліфікований обслуговуючий персонал, потребує значних капітальних вкладень та поточних експлуатаційних витрат. Внаслідок цього основними вимогами, що пред'являються до АСКТП, є її економічна ефективність (ЕЕ), а роботи по виявленню очікуваної ЕЕ є головними на стадії ТЕО.

Розглянемо методику експрес-обстеження ТОК, яка дозволяє дослідницькій групі з 10—15 осіб, до складу якої входять технологи, фахівці з керування, математики-програмісти та економісти, шляхом спрощеного моделювання і оптимізації за період 0,5—1 рік оцінити очікувану ЕЕ та видати необхідні вихідні дані для проектування АСКТП [19]. Припускається, що група працює на об'єкті, який раніш не вивчався в аспекті оптимізації, таким чином можуть бути невідомими навіть очевидні джерела ефективності; група має можливість користуватися парком необхідних ЕОМ та устаткуванням для статистичного обстеження ТОК.

Орієнтовний склад групи:

економісти та математики, фахівці з моделювання (3—5 осіб);

програмісти, фахівці з алгоритмізації та програмування (2—3 особи);

технологи даного виробництва (1—2 особи);

допоміжний персонал (лаборанти, техніки, 4—6 осіб).

Перша задача групи — виявлення можливих джерел ЕЕ. На першому етапі проводиться опитування технологічного та керівного персоналу приблизно за таким переліком питань.

1. Чи є "вузьке місце" по навантаженню? Тобто випадок, коли об'єкт має резерв потужності і навантаження лімітується з боку сировини.
2. Чи існує необхідність оперативного погоджування технологічних установок за навантаженнями та напівпродуктами, що виробляються?
3. Що є більш вигідним — створити АСК чи додаткову технологічну установку для ліквідації "вузького місця"?
4. Якою є економічна вага відходів виробництва? Якщо вона велика, то чи відомі умови її зменшення?
5. Якими є рециркуляти непереробленої частини сировини? Якщо їх можна скоротити без зниження ступеня перетворення в апаратах, то загальне завантаження при цьому підвищується.
6. Чи можна поліпшити якість продукту? Якщо так, то чи зміниться при цьому його відпускна ціна і як зросте собівартість?
7. Чи виникає потреба в оптимальному розподілі навантаження між паралельними агрегатами (реакційними системами)?
8. Які основні статті собівартості продукту? Економія яких статей собівартості може дати найбільший економічний ефект при заданих продуктивності та якості продукту?
9. Чи призводить поліпшення якості продукту, навіть при незначній відпускній ціні, до економії з боку споживача?
10. Яким є можливий масштаб тиражування АСК даного об'єкта на аналогічних об'єктах галузі?

Внаслідок такого анкетування та його обробки (наприклад, шляхом обчислення коефіцієнта конкордації) виявляються потенційні джерела економічного ефекту. Далі складається черговість дослідження цих джерел, яка відповідає розміру очікуваного економічного ефекту. В разі, коли приймається рішення про доцільність створення АСКТП (а не локальних систем оптимізації без координуючого центру) , необхідно провести прискорене моделювання, яке ґрунтується на обробці даних нормальної експлуатації.

Прискорене моделювання припускає такі дії:

1. Вивчення технологічної схеми.
2. Евристичну побудову підсистемної структури виробництва. Стосовно хімічного виробництва підсистемою, як вже відзначалось, може бути реактор, реакційне відділення, процес, цех та ін. Результатом цієї дії виробництво постане у вигляді деякої кількості підсистем, зв'язаних між собою матеріальними потоками.
3. Одержання статистичних оцінок параметрів матеріальних та енергетичних потоків з метою відбору істотних для моделі.
4. Виділення серед вхідних та вихідних діянь підсистем найбільш істотних. Для цього виконується оцінка характеристик відповідних потоків. У табл. 2.1 наведено приклад даних для такої оцінки.

*Таблиця 2.1*

#### Характеристики потоків

№ п/п	Параметри потоку	Позн а-	М	<i>a</i>	Ціна (г. од.)	Спосіб вимірювань
1	Етилен (витрата, т/г)	XI	7,33	0,49	91	Витратомір
2	Етилен (тиск, кг/см <sup>2</sup> )	X2	20	3	-	Манометр
3	Етилен (концентрація, %)	X3	98,7	0,3	-	Ручний відбір проб
4	Віддувки високого тиску, т/г	X4	2,91	0,07	-	Витратомір

5. Власне моделювання. Для кожної підсистеми матеріальні потоки характеризують безпосередньо видатком та одним-двома якісними показниками; виконується структурна ідентифікація, тобто визначення залежностей вихідних видатків від вхідних діянь; крім того, розраховуються матеріальні та енергетичні баланси підсистем та системи в цілому.

6. Ідентифікація. Під ідентифікацією розуміється обчислення коефіцієнтів

математичних моделей. За цією метою виконується:

а) збір даних нормальної експлуатації для всіх підсистем за вхідними та вихідними змінними. Для хіміко-технологічних процесів типовий розмір вибірки міститься у дво-, тримісячному відрізку часу. Вимоги до цих даних звичайні, як при статистичному аналізі: вплив входів на виходи за схемою "А-М-Н" (адитивно-мультиплікативно-незалежно);

б) координація змінних за часом, що містить зсув аргументів на величину запізнення з тим, щоб ідентифікувалась залежність:

$$y(t) = \sum_i a_i \cdot x_i(t - t_i), \quad (2.1)$$

де  $t_i$  — час запізнення.

Така координація необхідна тому, що найбільша кореляція (максимальний коефіцієнт кореляції або кореляційне відношення) між  $x$  і  $y$  має місце через  $t_i$  з моменту вимірювання  $x_i$ , в той час як в кореляційній таблиці — основному документі із збирання такої статистики — використовуються значення, зареєстровані в один і той самий момент часу

Розмір  $t_i$  визначається розрахунком взаємкорел'яційних функцій, але за перше наближення можна використати експериментальну оцінку чистого запізнення при східчастому збуренні;

в) проводиться власне регресійний аналіз: розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії та їх оцінок за  $t$ -критерієм, а також розрахунок коефіцієнтів множинної кореляції. Результатом є серія рівнянь регресії з чисельними значеннями коефіцієнтів.

## 7. Розрахунок оптимальних режимів.

Виконуються розрахунки екстремальних значень вихідних змінних при наявності обмежень, тобто в загальному випадку вирішується задача нелінійного програмування. На основі знайдених екстремальних значень вихідних змінних визначається розрахунковий показник якості  $Q_p(t)$ . Тривалість періоду, протягом якого ведуться розрахунки, має бути такою, яка забезпечує можливість одержати

достатню кількість якісних оцінок, однак з практичних міркувань можна його зазначити в 10—30 діб.

8. Порівнюються фактичні показники якості  $Q(p(t))$  з розрахунковими  $Q_p(t)$ . При цьому необхідно враховувати похибку у визначенні  $Q_p(t)$ , обумовлену неточностями моделей. Результат порівняння — очікуваний річний ЕЕ від впровадження АСКТП.

9. Маючи оцінку очікуваного річного ЕЕ і визначившись із терміном компенсації витрат  $t_{0K}$ , можна знайти припустиму вартість АСК з того, що вартість устаткування АСК плюс вартість проектно-будівельних робіт має дорівнювати ( $t_{0K}$ ).

10. Оцінка необхідного ЕЕ. Вона може бути виконана виходячи з того, що в хімічній промисловості припустима вартість АСК з обчислювальним комплексом становить приблизно 1: вартості всього виробництва, термін компенсації витрат не повинен перевищувати 1,5 року. Незважаючи на можливі похибки, результати роботи за попередньою оцінкою очікуваного річного ЕЕ мають досить велике значення, вони складають основу першого важливого документа, який готується при створенні АСКТП — техніко-економічного обґрунтування (ТЕО).

Розглянемо приклад застосування цієї методики до виробництва аміаку з коксового газу. Оброблювалися дані нормальної експлуатації однієї технологічної лінії, серед яких були виділені дві вихідні (результативні) змінні — вихід аміаку ( $y_1$ ) та вихід етиленової фракції ( $y_2$ ), а також сім вхідних (факторіальних) — витрата коксового газу ( $x_1$ ), витрата кам'яновугільного масла ( $x_2$ ), витрата хімічно очищеної води ( $x_3$ ), витрата пари тиском 16 атмосфер ( $x_4$ ), витрата пари тиском 40 атмосфер ( $x_5$ ), витрата азоту ( $x_6$ ) та витрата азотоводневої суміші ( $x_7$ ). Були одержані дві серії рівнянь регресії, серед яких найбільш адекватними виявились такі два рівняння:

$$y_1 = 702,687 - 0,012 \cdot x_1 + 7,526 \cdot x_2 + 2,624 \cdot x_3 - 3,540 \cdot x_4 - 1,089 \cdot x_5 - 0,032 \cdot x_6 + 0,011 \cdot x_7$$

(коефіцієнт множинної кореляції 0,852; F — відношення 14,384);

$$y_2 = 11,440 - 0,761E - 3 \cdot x_1 + 0,113E - 2 \cdot x_2 + 0,402E - \\ - 1 \cdot x_3 + 0,250 \cdot x_4 - 0,117 \cdot x_5 + 0,708E - 1 \cdot x_6 - 0,235E - 3 \cdot x_7$$

(коефіцієнт множинної кореляції 0,912; F — відношення 12,919).

Були виконані розрахунки оптимальних режимів для обох вихідних змінних на основі матеріалів п'ятнадцятидобової нормальної експлуатації. На рис. 2.2 та 2.3 наведено результати порівняння фактичних показників якості з розрахунковими. Очікуваний річний ЕЕ від впровадження АСКТП виявився для аміаку у розмірі 170 тис.крб., а для етиленової фракції 220 тис.крб. (у цінах 1985 року).

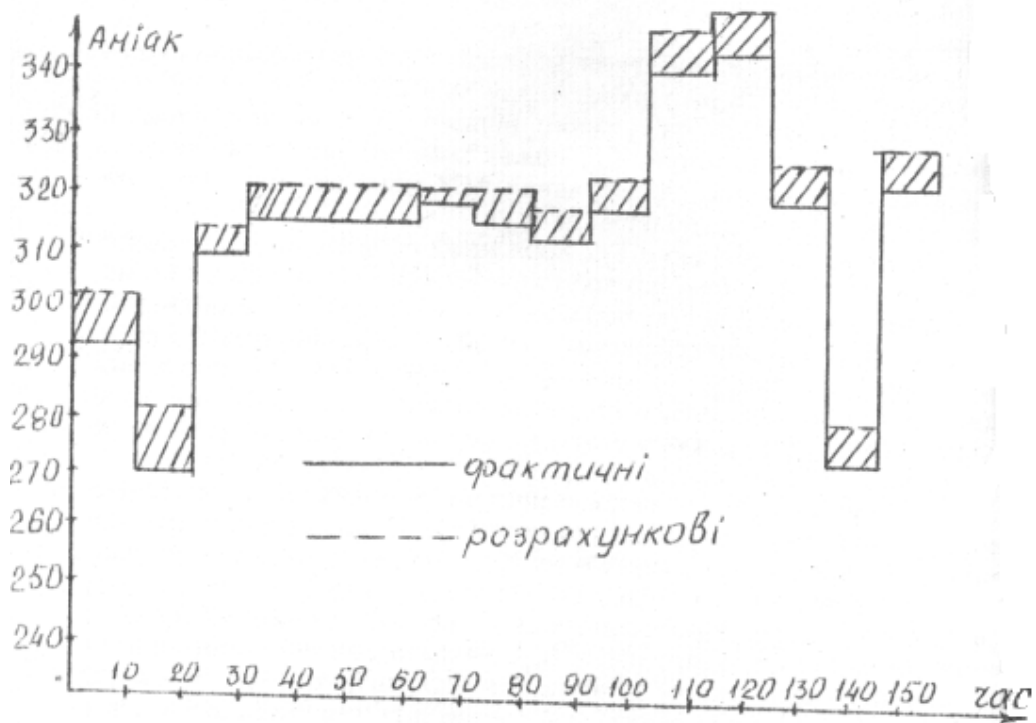


Рис. 2.2. Показники якості аміаку



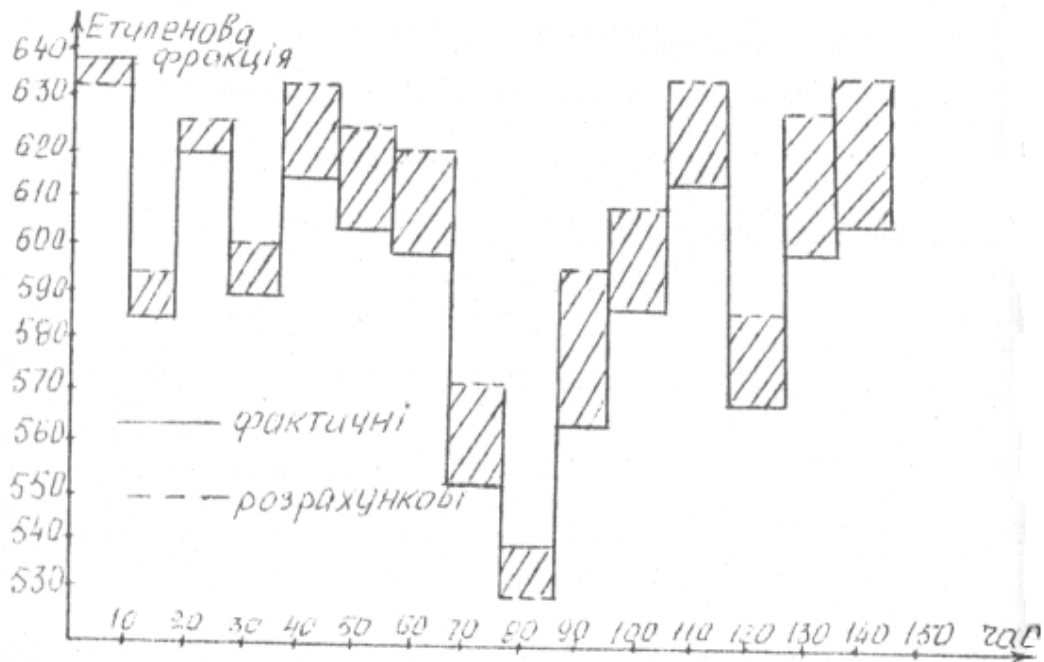


Рис. 2.3. Показники якості етиленової фракції

### 2.3. Технічне завдання

Передпроектні НДР стадії ТЗ спрямовані на вивчення найбільш складних задач керування даним об'єктом. Як зазначалося, основною задачею створення АСКТП є задача синтезу КП, який відповідно до рис. 2.1 реалізував би ціль керування в замкненому контурі. Саме до розглядання питання про ціль керування ми й перейдемо [19].

#### 2.3.1. Формулювання критеріїв керування

Зв'язки, що існують між виділеними при аналізі ТОК векторами параметрів мають знайти відображення в КП у вигляді математичної моделі:

$$\bar{F}(\bar{U}, \bar{X}, \bar{Z}, \bar{Y}) = 0, \quad (2.2)$$

Важливим випадком, який часто зустрічається на практиці, є такий, коли розглядається залежність

$$\bar{Y} = \bar{j}(\bar{X}, \bar{U}), \quad (2.3)$$

або з урахуванням запроваджених раніше розмірностей векторів:

$$Y_i = j_i(x_1 \dots x_n, u_1, \dots, u_r), i = 1, m, \quad (2.4)$$

Функція  $j$  відома під назвою цільова. Чисельне значення  $j$ , яке може бути використано як міра якості керування, зветься критерієм керування. Оскільки критерієм керування є кількісна оцінка, яка дозволяє порівнювати між собою неоднакові стани ТОК в процесі роботи системи керування і в різні моменти часу, то цілком природно зв'язати його значення  $R$  з вимірюваними значеннями вектора виходу  $Y$ :

$$R = R(\bar{Y}), \quad (2.5)$$

В математичному сенсі критерій керування являє собою функціонал від траєкторії змінення стану системи  $X(t)$  і деякої стратегії керування  $U(t)$ . Достатньо загальною формою критерію керування є інтегральний критерій виду:

$$R = m[\overline{X(T)}] + \int_0^T q(\bar{X}, \bar{U}) dt, \quad (2.6)$$

де  $m[\overline{X(t)}]$  — скалярна функція, що описує якість кінцевого стану  $X(t)$ ;  $q(\bar{X}, \bar{U})$  — скалярна функція, яка є миттєвою характеристикою якості керування.

Розглянемо детальніше перший доданок у формулі (2.6). Основними факторами, що характеризують результат функціонування ТОК на деякому інтервалі часу, а саме в такому сенсі тут використано поняття кінцевого стану, є такі: продуктивність  $B$  (кількість виробленої продукції за одиницю часу); собівартість  $C$  (грошова одиниця на одиницю виробленої продукції) та якість, яка вимірюється параметром  $F$ . Будь-яка зміна режиму призводить, в загальному випадку, до зміни всіх трьох факторів, причому бажана зміна одного з них супроводжується, як правило, небажаним відхиленням двох останніх. Вибір оптимального режиму — це вибір найвигіднішого компромісу між поліпшенням одних факторів і погіршенням інших.

Співвідношення між якістю та продуктивністю ( $F_{я}$ , —  $B$ ) можна установити у тих випадках, коли є можливим облік економічних наслідків від зміни якості у сфері споживання продукції. Для більшості видів хімічної продукції такий облік виявляється можливим, тобто підвищення якості забезпечує визначений економічний ефект ( $E_{я} > 0$ ) за рахунок скорочення витратних норм, зменшення

витрат на переробку, збільшення строку служби та ін. Навпаки, зниження якості продукції призводить до додаткових витрат ( $E_y < 0$ ) у сфері її подальшої переробки та використання. Для обліку зміни якості" продукції може бути використаний так званий індекс якості  $I_y$ :

$$I_y = (C + E_y) / C = B / B_y, \quad (2.7)$$

де  $C$  - ціна на продукт номінальної якості;  $E_y$  — економічний ефект в сфері споживання за рахунок відхилення якості від номінальної

( $T \neq 0$ );  $B_y$  — кількість продукції фактичної якості, яка економічно еквівалентна кількості  $B$  продукції номінальної якості.

Індекс якості  $I_y$  є безперервною на деякому інтервалі функцією  $F_-$ . Цей індекс більш правильно, ніж система цін за сортами, відображує значення для виробництва зміни якості продукції.

Щодо співвідношення між собівартістю та продуктивністю ( $C$ —  $B$ ), то, не вдаючись до економічних тонкощів, можна сказати, що це співвідношення повинно забезпечити:

або мінімум собівартості при плановій продуктивності

$$C \Rightarrow C_{\min}, B = \text{const} = B_{nl}, \quad (2.8)$$

або максимум продуктивності при плановій собівартості:

$$B \Rightarrow B_{\max}, C = \text{const} = C_{nl}, \quad (2.9)$$

Для підприємства хімічної галузі умова максимуму прибутку може бути сформульована так:

$$D = C \cdot B - Z \rightarrow \max, \quad (2.10)$$

де  $Z$  — загальні витрати на виробництво.

Кожний з трьох критеріїв (2.8)—(2.10) має обмежене застосування, іноді виникає необхідність переходити з урахуванням кон'юнктури від одного до другого. В цілому для хімічних виробництв частіше використовуються критерії! (2.8). Нагадаємо, що під собівартістю продукції ( $C_{\text{пр}}$ ) розуміються повні витрати на виробництво одиниці продукції, які включають вартість витрачених матеріалів,

сировини, палива та енергії, амортизаційні відрахування, заробітну плату обслуговуючого персоналу та інші витрати.

$$C_{np} = 1/B(C_C + C_T + C_{II}), \quad (2.11)$$

де  $C_{np}$  — собівартість продукції, що випускається (грошова одиниця/одиниця продукції);  $C_C$  - витрати на сировину (грошова одиниця/одиниця часу);  $C_T$  — змінні (технологічні) витрати (грошова одиниця/одиниця часу);  $C_{II}$  — постійні витрати (грошова одиниця/одиниця часу).

Розглянемо всі складові собівартості.

1. Втрати на сировину  $C_C$  є пропорційними об'єму продукції, що випускається, і можуть обчислюватись з урахуванням коефіцієнта використання сировини  $V$ :

$$C_C = B[S_C - (1 - V)S_B] = BS'_C, \quad (2.12)$$

де  $S_C$  — вартість сировини, необхідної для виробництва одиниці продукції;  $S_B$  — вартість відходів сировини, що реалізується. При повному використанні сировини коефіцієнт  $V = 1$ . При вирішенні задач оптимізації  $V$  — змінна величина, її значення залежить від режиму процесу.

Якщо утворюються побічні продукти у кількостях, пропорційних  $B$ , які також реалізуються за деякими цінами, то одержувана при цьому частина вартості може бути віднесена до зниження втрат на сировину. Тоді  $C_C$  визначиться так:

$$C_C = B \left[ S_C - (1 - V)S_B - \sum_C nob_i b_i \right] = BS''_C, \quad (2.13)$$

де  $S_{nob_i}$  — вартість реалізації одиниці  $i$ -го побічного продукту (грошова одиниця/одиниця продукції);  $b_j$  — кількість одиниць  $i$ -го побічного продукту, що виробляються на одиницю основного продукту.

2. Змінні (технологічні) витрати  $C_T$  складаються з вартості електроенергії, пари, охолоджуючої води, допоміжних матеріалів (наприклад, каталізатора або розчинника) та ін. і є пропорційними продуктивності:

$$C_T = B \cdot S_T; \quad (2.14)$$

$$S_r = \sum_i S_{li} \cdot q_i, \quad (2.15)$$

де  $S_r$  — об'єм змінних витрат на одиницю продукції;  $S_{li}$  — вартість одиниці енергетичного потоку або одиниці допоміжних матеріалів;  $q_i$  — кількість одиниць  $i$ -го енергетичного потоку або допоміжного матеріалу, які необхідні для виробництва одиниці основної продукції.

До змінних витрат відноситься також заробітна плата обслуговуючого персоналу тих виробництв, де оплата робиться відповідно до обсягу вироблюваної продукції. В цьому разі  $S_T$  визначається так:

$$S_r = \sum_i S_{li} \cdot q_i + S_3, \quad (2.16)$$

де  $S_3$  — основний заробіток або доплата до основного окладу обслуговуючого персоналу за одиницю вироблюваної продукції (грошова одиниця /одиниця продукції).

3. Постійні витрати  $C_{\Pi}$  не залежать від  $B$ , вони обумовлені об'ємом капітальних вкладень у основні фонди, вартістю планових та профілактичних ремонтів устаткування та рівнем зарплати обслуговуючого персоналу, що сплачується за системою окладів.

$$C_{\Pi} = S_a + S_p + S_{3\Pi}, \quad (2.17)$$

де  $S_a$  — амортизаційні відрахування;  $S_p$  — вартість планових та профілактичних ремонтів;  $S_{3\Pi}$  — постійна частина зарплати обслуговуючого персоналу.

Такими є основні складові частини собівартості, мінімізація технологічної складової якої є ціллю керування згідно з критерієм (2.8). Становить інтерес також задача вибору оптимальної продуктивності  $B_{\text{опт}}$ , за якою досягається мінімальна собівартість. Типовий характер залежності собівартості від продуктивності показаний на рис. 2.4.

При розгляді цієї кривої видно, що до певної межі підвищення  $B$  призводить до зниження  $C_{\Pi}$  за рахунок зменшення частки постійних витрат  $C_{\Pi}$  (до точки  $B_{\text{опт}}$ ), однак подальше форсування режиму виявляється можливим лише за рахунок

збільшення питомих витрат сировини та енергії, внаслідок чого собівартість починає також збільшуватися. Оптимальне значення продуктивності  $V_{\text{опт}}$  визначається за умовою:

$$dC_{\text{пр}} / dB = 0, \quad (2.18)$$

Відповідно до викладеного прибуток, який одержується в одиницю часу, становитиме

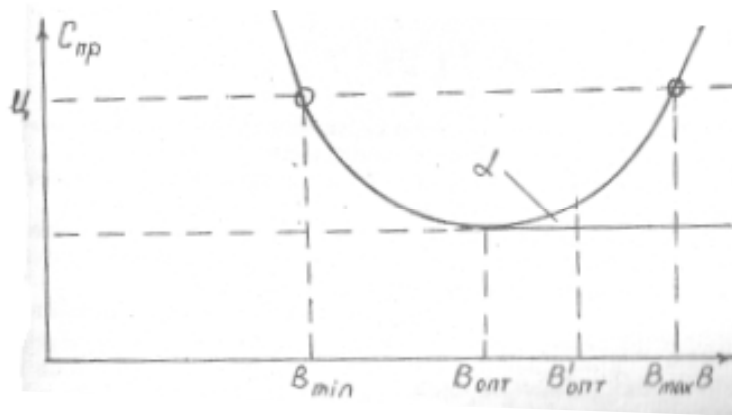


Рис. 2.4. Залежність собівартості від продуктивності

$$D = B(\Pi - C_{\text{пр}}), \quad (2.19)$$

де  $\Pi$  — ціна продукції (грошова одиниця/одиниця продукції). Оптимальна продуктивність

$$dD / dB = \Pi - C_{\text{пр}} - B(dC_{\text{пр}} / dB) = 0, \quad (2.20)$$

звідки

$$dC_{\text{пр}} / dB = (\Pi - C_{\text{пр}}) / B, \quad (2.21)$$

Знак правої частини визначається знаком різниці між ціною  $\Pi$  та собівартістю  $C_{\text{пр}}$ , тому що  $B$  завжди більше нуля. Таким чином, додатним значення  $dC_{\text{пр}} / dB$  відповідають значення продуктивності, більші за  $V_{\text{опт}}$ , тобто для одержання максимального прибутку необхідно проводити процес при значеннях продуктивності  $V_{\text{опт}}$ , більших ніж  $V_{\text{опт}}$ . Ця ситуація зображена на рис. 2.2 у вигляді інтервалу  $V_{\text{опт}}$  —  $V_{\text{шах}}$ , на якому тангенс кута визначається так:

$$\text{tg } \alpha = (\Pi - C_{\text{пр}}(B_{\text{опт}})) / B_{\text{опт}}, \quad (2.22)$$

З цього рисунку слід також зазначити про наявність інтервалу продуктивності ( $V_{\text{тип}} — V_{\text{шах}}$ , за межами якого прибуток не існує.

Повернемося до другого доданку у формулі (2.6). Він характеризує якість керування за період  $t$  від 0 до  $T$ . Для багатьох технологічних процесів хімічних виробництв критерій якості керування визначає задачу: перевести ТОК із початкового стану  $X(0)$  до кінцевого  $X(T)$  за мінімальний час:

$$R = \int_0^T 1 \cdot dt = T, \quad (2.23)$$

Формулювання критерію керування стосовно АСК хіміко-технологічними процесами має дві особливості:

1) необхідність переходу від показників якості економічних до показників технологічних;

2) необхідність взаємоув'язання загального (глобального) критерію керування технологічним процесом і локальними критеріями окремих його частин (блоків, установок, відділень та ін.).

Так, глобальний критерій для АСКТП технологічною лінією виробництва аміаку з коксового газу:

$$C_{np} = \sum_i k_i C_i / B + C_n \rightarrow C_{np \min}, \quad (2.24)$$

де  $k_i$   $C_i$  — витрати на відповідний матеріальний або енергетичний потік, може бути поданий у розгорнутому вигляді через суму локальних критеріїв трьох його відділень.

$$\begin{aligned} C_{np} = & (k_1 G_{KBM} + k_2 G'_a + k_3 G'_n + k_4 G'_e + k_5 G'_n) / B + \\ & + (k_6 G''_{aBC} + k_7 G''_e + k_8 G''_n + k_9 G''_{a3}) / B + \\ & + (k_{10} G'''_a + k_{11} G'''_e + k_{12} G'''_n + k_{13} G'''_{aBC}) / B + C_n \end{aligned}, \quad (2.25)$$

Тут  $k_1 — k_{13}$  — коефіцієнти;  $B$  — задана продуктивність;  $G_{KBM}$ ,  $G_a$ ,  $G_n$ ,  $G_e$ ,  $G_n$ ,  $G_{aBC}$ ,  $G_{a3}$  — витрати відповідно кам'яновугільного масла, аміаку, пари, електроенергії, лугу, азотоводневої суміші та азоту (штрихами позначені номери відділень).

Щодо локальних технологічних критеріїв, то, наприклад, для вузла очищення від бензолу та нафталіну (рис. 1.5) якість керування визначається вмістом бензолу

в КГ на виході колони денафталізації. У зв'язку з цим може бути використаний технологічний критерій виду:

$$K = G_{d.k} / C_{np}, \quad (2.26)$$

де  $C_{б.к}$  — поточна концентрація бензолу в КГ;  $C_{np}$  — гранична припустима концентрація бензолу на виході вузла.

Задачею керування вузлом є визначення статично (на інтервалі між двома аналізами) оптимальних значень параметрів вектора керування, які задовольняють існуючі технології обмеження та забезпечують підтримання критерію керування в області значень, близьких до одиниці. При цьому зв'язок між векторами значень технологічних параметрів виражається через математичну модель процесу. Таким чином, формалізація критерію та задачі керування призводить до наступних залежностей в загальному вигляді:

$$Y_1 = F(U_1, U_2, X_1, X_2, X_3, Z_1,)$$

$$U_{1\min} \leq U_1 \leq U_{1\max}$$

$$U_{2\min} \leq U_2 \leq U_{2\max}$$

$$\bar{U} \rightarrow \bar{U}_{opt}$$

$$K \rightarrow 1$$

### 2.3.2. Розробка попередніх математичних моделей

При проектуванні АСКТП математичні моделі використовуються для визначення законів керування (синтез КП); імітації технологічного процесу з метою перевірки законів керування; оцінки тих змінних стану та параметрів, які не піддаються вимірюванню, або для передбачення станів, стосовно реального керування.

Як найбільш загальний захід при розробці математичних моделей може бути використаний так званий блочний принцип. Згідно з ним розробці загальної математичної моделі передують аналіз окремих "елементарних" підпроцесів, до яких відносяться: рух потоків фаз, хімічні перетворення, масообмін між фазами, теплопередача, зміна агрегатного стану речовини.

Спочатку пропонується досліджувати гідродинаміку процесу як основу структури математичної моделі. Далі вивчають кінетику хімічних реакцій,



процесів масо- і теплопередачі. Заключним етапом є поєднання моделей всіх "елементарних" підпроцесів в єдину систему рівнянь. Крім того, до складу моделі входять різні емпіричні та напівемпіричні залежності між параметрами процесу.

На основі блочного принципу може бути побудована і так звана нормативна алгоритмічна модель, для створення якої використовуються відомості про об'єкт керування, наведені у довідниках, технічних керівництвах та в іншій нормативній літературі.

До складу математичної моделі входять нелінійні алгебраїчні або трансцендентні рівняння, звичайні диференціальні рівняння, диференціальні рівняння з частинними похідними, системи лінійних алгебраїчних рівнянь. До алгебраїчних рівнянь зводиться математичний опис статичних режимів роботи об'єктів, які розглядаються як об'єкти з зосередженими параметрами. Звичайні диференціальні рівняння використовуються для математичного опису динаміки об'єктів з зосередженими параметрами, а також статичних режимів об'єктів з розподіленими параметрами, в яких значення параметрів залежать від однієї просторової координати. В першому випадку як незалежну змінну в диференціальних рівняннях використовують час, в другому — просторову координату, обов'язковим є завдання початкових умов. Диференціальні рівняння з частковими похідними використовуються для математичного опису динаміки об'єктів з розподіленими параметрами або статички таких об'єктів, в яких розподіленість присутня більш, ніж по одній просторовій координаті. Для таких рівнянь, крім початкових умов, треба задавати також граничні умови, які в загальному випадку є функціями часу.

### **2.3.3. Ідентифікація математичних моделей в АСКТП**

Характеристики моделі визначають структуру, об'єм та точність функціонування алгоритмів керування, а ці фактори, в свою чергу, визначають ефективність АСКТП в цілому, тобто далеко не всякі математичні моделі можна з успіхом використовувати в алгоритмах та програмах АСКТП. На практиці ідентифікація моделей виконується в декілька етапів.

На першому етапі, який відповідає стадії ТЕО, обирають структуру моделі, оцінюють стаціонарність та ергодичність основних параметрів процесу, перевіряють можливість використання лінійних залежностей. На другому етапі, який відповідає стадії ТЗ, на базі експериментальних даних, одержаних в умовах експлуатації об'єкта, уточнюють структуру моделі і визначають необхідні кількісні співвідношення та числові коефіцієнти. Тут же перевіряють ступінь адекватності моделі об'єктові. На третьому етапі (стадії реалізації") уточнюються різні кількісні характеристики моделі, зокрема її коефіцієнти, за даними функціонування системи керування. Необхідність в таких уточненнях виникає через зміни за часом деяких характеристик об'єкта, зміни збурювань та ін., що об'єднується в поняття нестаціонарності ТОК.

Існуючі методи ідентифікації можна розподілити на дві групи: 1) методи, які використовуються при ідентифікації стаціонарних об'єктів; 2) методи, які використовуються при ідентифікації нестаціонарних ТОК [24].

З методів першої групи слід виділити ітеративні модифікації відомого методу найменших квадратів. Використання ітеративних методів дозволяє позбавитися від етапу попереднього накопичення інформації, а одержання поточних значень ступеня адекватності моделі об'єкта дає змогу зупинити процес ідентифікації при досягненні показником адекватності бажаного рівня. Зрозуміло, що все це призводить до економії часу та ресурсів при розробці АСКТП.

Методи другої групи, у припущенні, що об'єкт є квазістаціонарним, використовують значення оцінок коефіцієнтів на інтервалах стаціонарності, а при значній нестаціонарності — оцінки, що одержують при кожній ітерації. При цьому "нові" значення змінних об'єкта використовуються з більшою вагою, ніж "старі", які вже не відповідають характеристикам, що змінилися. Типовий метод другої групи — метод плинного середнього.

Загальним підходом до вирішення задач ідентифікації є стоха-стичний, коли принаймні одна з трьох компонент — вхід, вихід або об'єкт — випадкові.

Розглянемо спочатку задачу ідентифікації стаціонарних об'єктів із випадковими величинами на вході — виході. Об'єкт вважається безінерційним,

тобто властивості запізнення сигналу не враховуються; вихідна змінна також розглядається як випадкова величина, а не функція.

На практиці до таких задач належать задачі керування якістю продукції, розрахунки точності, надійності та ін.

Припустимо, що внаслідок експериментальних або теоретичних досліджень було встановлено, що закони розподілу випадкових величин входу та виходу є нормальними, їх сумісна щільність також нормальна, тобто:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m_x}{d_x}\right)^2\right]; \\ f(y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m_y}{d_y}\right)^2\right]; \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-r_{yx}^2}d_xd_y} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r_{yx}^2)}\left[\left(\frac{y-m_y}{d_y}\right)^2 + \left(\frac{x-m_x}{d_x}\right)^2 - 2r_{yx}\frac{(x-m_x)\cdot(y-m_y)}{d_xd_y}\right]\right\},$$

де

$$m_y = \int_{-\infty}^{\infty} yf(y)dy; d_y = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (y-m_y)^2 f(y)dy};$$

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx; d_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x-m_x)^2 f(x)dx};$$

$$r_{yx} = \frac{k_{yx}}{d_xd_y} = \frac{\text{cov}(y, x)}{d_xd_y} - \text{коефіцієнт кореляції};$$

$K_{yx} = \text{cov} = \{M(y-m_y)(x-m_x)\}$  — змішаний центральний момент другого порядку або коваріація.

У такому вигляді (2.28) маємо задачу у повних ймовірнісних характеристиках. Дійсно, щільність ймовірності  $f(x)$  є повною ймовірнісною характеристикою вхідної випадкової величини, а  $f(y)$  — вихідної, причому  $x$  та  $y$  залежні, коефіцієнт кореляції не дорівнює нулю. Повною характеристикою об'єкта є оператор  $A$ , який встановлює відповідність між цими двома функціями:

$$f(y) = Af(x), \quad (2.29)$$

Якщо прийняти, що конструкція та технологічний процес досліджуваного об'єкта не змінюються або змінюються в незначних межах, то закон умовного

розподілу ймовірності у відносно  $x$  буде також незмінним:

$$f(y/x) = f(y, x) / f(x), \quad (2.30)$$

Таким чином, в цьому випадку в ролі оператора об'єкта  $A$  виступає умовна щільність розподілу  $f(y/x)$ , яка в загальному випадку, коли закони розподілу  $f(x)$  та  $f(y)$  невідомі, визначається з інтегрального рівняння, здобутого шляхом інтегрування (2.30) по  $x$ :

$$f(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y/x) f(x) dx, \quad (2.31)$$

Для задачі (2.28), коли розглядається випадок нормального закону розподілу, повна характеристика об'єкта може бути визначена з (2.30):

$$f(y/x) = \frac{f(y, x)}{f(x)} = \frac{1}{\sqrt{2p} d_y \sqrt{1 - r_{yx}^2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2(1 - r_{yx}^2)} \cdot \left[ \frac{(x - m_x)^2}{d_x^2} - \frac{2r_{yx}(x - m_x)(y - m_y)}{d_x d_y} + \frac{(y - m_y)^2}{d_y^2} + \frac{(x - m_x)^2}{2d_x^2} \right] \right\}, \quad (2.32)$$

або після перетворень:

$$f(y/x) = \frac{1}{\sqrt{2p(1 - r_{yx}^2)} d_y} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2d_y^2(1 - r_{yx}^2)} \cdot \left[ y - m_y - r_{yx} \frac{d_y}{d_x} (x - m_x) \right]^2 \right\}, \quad (2.33)$$

Таким чином, можна позначити два шляхи вирішення задачі. Перший — емпіричний, коли за результатами вимірювань заповнюється кореляційна таблиця, з якої одержуються як емпіричні закони розподілу вхідної  $f^*(x_i)$  та вихідної  $f^*(y_j)$  величин, так і емпіричний закон їх сумісного розподілу  $f^*(y_i, x_j)$ . Зв'язок між ними і шуканою характеристикою об'єкта  $f^*(y_j | x_j)$  встановлюється співвідношенням, яке є дискретним аналогом (2.31):

$$f^*(y_j) = \sum_{i=1}^{P_x} f^*(y_j / x_i) f^*(x_i), j = 1, P_y, \quad (2.34)$$

де  $P_x$  та  $P_y$  — кількості інтервалів групування по  $x$  та по  $y$  кореляційної таблиці.

Другий шлях полягає в попередньому отриманні аналітичних уявлень функцій  $f(x)$  та  $f(y)$ , а потім у вирішенні задачі у повних ймовірнісних

характеристиках.

Розглянемо випадок (рис.2.5), коли на вході і виході об'єкта діють випадкові функції  $x(t)$  та  $y(t)$ , а сам об'єкт є інерційним з часом запізнення. Це є задача ідентифікації лінійних динамічних об'єктів.

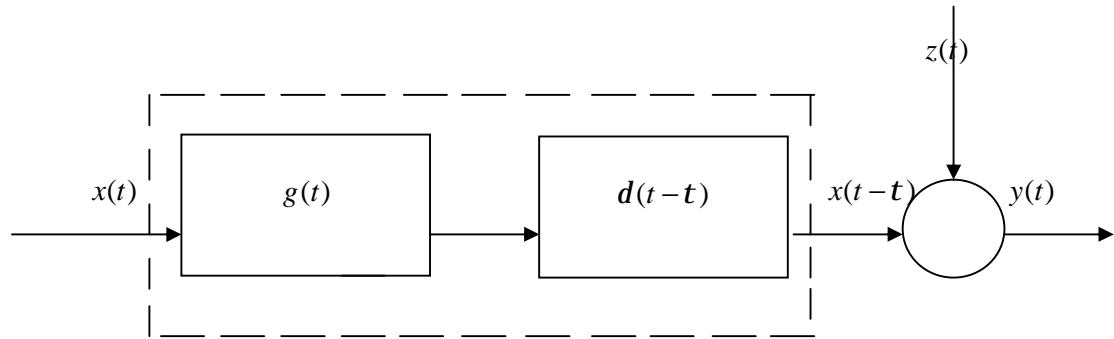


Рис. 2.5. Схема інерційного ТОК

Якщо розглядати об'єкт за такою схемою, то залежність між параметрами матиме вигляд:

$$y(t) = z(t) + \int_0^{\infty} g(t)x(t-t)dt, \quad (2.35)$$

де  $z(t)$  — завада, не корельована з  $x(t)$ ;  $g(t)$  — імпульсна перехідна функція (ІПФ), яка є повною характеристикою об'єкта. Слід зазначити, що другий доданок у залежності (2.35) відомий у літературі як інтеграл згортки (або Дюамсля) [14]. Зупинимося дещо докладніше на фізичному сенсі інтеграла згортки і, таким чином, цілком на залежності (2.35) для лінійного об'єкта, коли справедливим є принцип суперпозиції.

Припустимо, що вхід  $x(t)$  становить послідовність імпульсів тривалістю  $T$  і амплітудою  $x(t)$ , які прикладаються в моменти часу  $t = 0, T, 2T, \dots$  з площею (енергією)  $T x(t)$  (рис. 2.6).

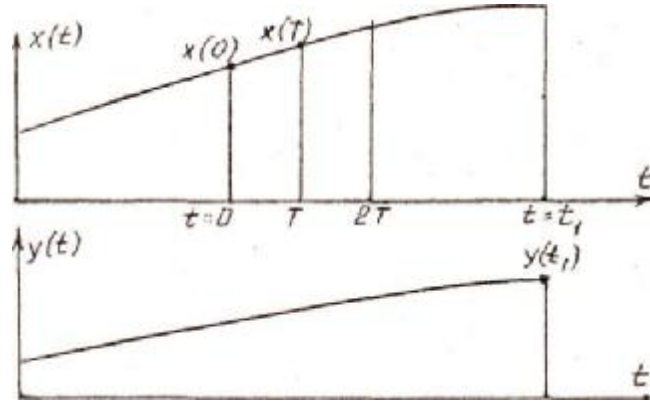


Рис. 2.6. Фізичний сенс інтеграла згортки

Будемо вважати, що  $y_i(t)$  означає реакцію об'єкта в момент часу  $t$  на один  $i$ -й імпульс, тобто на імпульс, прикладений в момент часу

$$t = (i-1)T, (i=1,2,\dots),$$

Таким чином,  $y_1(t)$  означає реакцію в момент часу  $t = t_1$  на перший імпульс з енергією  $Tx(0)$ , прикладений в момент часу  $t = 0$ :

$$y_1(t_1) = g(t_1)T \cdot (0),$$

Аналогічно  $y_2(t_1)$  означає реакцію в момент часу  $t = t_1$  на наступний імпульс з енергією  $Tx(T)$ , прикладений в момент час  $t = T$ :

$$y_2(t_1) = g(t_1 - T)T \cdot (T),$$

І нарешті, реакція  $y_i$  на  $i$ -й імпульс, який був прикладений в момент  $t = (i-1)T$ :

$$y_i(t_1) = g[t_1 - (i-1)T]T \cdot [(i-1)T], \quad (2.36)$$

Враховуючи лінійність об'єкта, знаходимо  $y(t_1)$  як сумарну реакцію на  $p$  прикладених імпульсів:

$$y(t_1) = \sum_{i=1}^n y_i(t_1) = \sum_{i=1}^n g[t_1 - (i-1)T]T \cdot [(i-1)T], \quad (2.37)$$

Визначення ординат шуканої ППФ безпосередньо за залежністю (2.37), яка є дискретним аналогом інтеграла згортки, пов'язано з досить істотними похибками. Для підвищення якості результату процесу ідентифікації ("відбудови" ППФ) необхідна попередня обробка сигналів. За результатами спостережень  $x(t)$  та  $y(t)$  можна визначити взаємну кореляційну функцію  $R_{yx}(t)$ , що описує взаємозв'язок між сигналом  $y(t)$  в будь-який момент часу  $t$  та сигналом  $x(t - \tau)$  в момент часу  $(t - \tau)$ . Одночасно можна визначити автокореляційну функцію  $R_{xx}(t)$  через добуток сигналу  $x(t)$  на значення того самого сигналу в момент часу  $(t - \tau)$ . В такому випадку основне рівняння статистичної ідентифікації, яке відоме в літературі як рівняння Віннера-Хопфа [14], має вигляд:

$$R_{yx}(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) R_{xx}(t - \tau) d\tau, \quad (2.38)$$

Виходячи з фізичних міркувань, зв'язаних з реєстрацією випадкових сигналів на скінченних інтервалах спостережень, необхідно замінити верхню межу інтегрування на таку величину  $T_c$ , щоб для всіх  $t > T_c$   $g(t)$  приблизно дорівнювала нулю:

$$R_{yx}(t) = \int_0^{T_c} g(\tau) R_{xx}(t - \tau) d\tau, \quad (2.39)$$

Таким чином, практичний шлях вирішення задачі ідентифікації полягає в розв'язанні рівняння Віннера-Хопфа, яке зводиться до рішення системи лінійних рівнянь. Інтервал  $0 - T_c$  розбивають на  $m$  рівних інтервалів  $\tau = T, 2T, \dots, mT$ . Тоді інтегральне рівняння може бути подане у вигляді скінченної суми:

$$\frac{1}{T} R_{yx}(iT) = \sum_{i=1}^m g_i R_{xx}(t - iT), \quad (2.40)$$

де  $g_i = g(iT), i = 1, 2, \dots, m$ .

Для всіх значень  $t$  одержимо  $m$  лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення  $m$  значень ординат ІПФ у точках  $T, 2T, \dots, mT$ . У матричній формі (2.40) має вигляд:

$$R_{xx} G = R_{yx}, \quad (2.41)$$

де  $R_{xx}$  — кореляційна матриця, складена із значень ординат автокореляційної функції вхідного сигналу  $x(t)$ :

$$R_{xx} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mm} \end{pmatrix}, \quad (2.42)$$

$R_{xy}$  — матриця-стовпець, елементами якої є ординати взаємної кореляційної функції сигналів та виходу:

$$R_{xy} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_m \end{pmatrix}, R_i = R_{yx}(iT)/T; \quad (2.43)$$

$G$  — матриця-стовпець невідомих ординат шуканої ІПФ:

$$G = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_m \end{pmatrix}. \quad (2.44)$$

Примітка. Необхідно звернути увагу на те, що система (2.41) іноді може не мати сталого рішення. Відомо, що її рішенням є  $G = R_{xx}^{-1} R_{yx}$ . Проте наближене обчислення кореляційних функцій може призвести до поганої обумовленості оберненої матриці  $R_{xx}^{-1}$ , тобто до порушення умов сталості рішення. Задача виявляється некоректною за Адамаром: навіть невеликі похибки вхідних даних можуть призвести до значних похибок результату. В такому разі необхідно використовувати спеціальні методи вирішення некоректних задач, наприклад методу



регуляризації А.Н.Тихонова [24 ].

### **Глава 3. Проектування та розробка АСКТП**

Основна сукупність робіт з технічного та робочого проектування АСКТП, яку виконує генеральний розробник системи, полягає в створенні алгоритмів і програм для засобів керуючої обчислювальної техніки.

Результатом робіт мусить бути те, що АСКТП стане здатною виконувати відповідно до ТЗ свої інформаційні та керуючі функції.

#### **3.1. Проектування та розробка інформаційного забезпечення (ІЗ)**

##### **3.1.1. Призначення та алгоритм функціонування ІЗ**

Інформаційні функції (інформаційний режим) в АСКТП реалізуються за допомогою інформаційної підсистеми.

Основними функціями інформаційної підсистеми є:

опитування стану ТОК;

аналіз стану ТОК, в тому числі сигналізація про відхилення значень параметрів від регламентованих, контроль достовірності технологічної інформації, контроль та прогнозування передаварійних ситуацій;

візуалізація та реєстрація істинних значень технологічних параметрів як у періодичному (ведення технологічних журналів, друкування рапортів та ін.), так і в довільному (видача інформації за ініціативою оператора) режимах;

розрахунок техніко-економічних показників (ТЕП);

виконання функцій обслуговуючої підсистеми відносно підсистеми: створення і оперативне ведення бази даних системи.

Розглянемо спочатку принцип організації ІЗ. На логічному рівні воно складається з двох частин — програм і даних.

Дані організуються у вигляді бази даних (БД) АСКТП. Система керування базою даних (СКБД) забезпечує програмний та операторський доступ до даних. Інформація, що міститься в БД, може бути віднесена до одного з двох типів:

умовно постійна (логіко-означна) та змінна (технологічна). Інформація першого типу містить вказівки для оброблювання програмами даних, що надходять від ТОК. Інформація другого типу характеризує поточні миттєві або інтегровані за певний період значення технологічних параметрів. Вся сукупність даних, що зберігаються у БД, ділиться на набори даних або файли. Файли складаються із записів постійної довжини. Записи, в свою чергу, діляться на елементи, що є неподільною одиницею інформації. Елементами запису можуть бути: цілі числа, дійсні числа, послідовності бітів, послідовності символів.

Логічне уявлення даних показане на рис. 3.1.

В основі засобу звернення до даних лежить трикоординатна ідентифікація елементів за трійкою: номер файла, номер запису, номер елемента. Логічні методи доступу до даних роблять прикладні програми незалежними від типу запам'ятовуючого пристрою, від місцезнаходження даних, від розміру поля елемента даних. Доступ до даних виконується тільки через СКБД. Природно, що СКБД не виконує функцій керування технологічним об'єктом, а є загальносистемним засобом, що дозволяє проводити структурування даних, їх обслуговування (завантаження, контроль, змінювання) та доступ до даних з боку програм. Увесь набір функцій СКБД поділяється на дві групи:

ОБД																			
Файл							Файл 2				...	Файл к	Резерв						
З			З				З	Р	З	З		З	Р						
а			а				а	е	а	а		а	е						
п			п				п	з	п	п		п	з						
и			и			...	и	е	и	и	...	и	е						
с			с				с	р	с	с		с	р						
1			2				М	в	1	2		N	в						
Е	Е	.	Е	Е	Е	.	Е												
л	л	.	л	л	л	.	л												
е	е	.	е	е	е	.	е												
м	м		м	м	м		м												
е	е		е	е	е		е												
н	н		н	н	н		н												
т	т		т	т	т		т												
1	2		L	1	2		L1												

Рис. 3.1. Логічне уявлення даних у БД

оголошення та обслуговування даних;

забезпечення доступу до даних.

Перша група функцій може бути реалізована як сукупність команд оператора і програми зв'язку з оператором, а друга — використанням бібліотеки підпрограм.

Розглянемо, як приклад, структуру файла аналогових сигналів. Це багатозаписний файл, кількість записів якого відповідає кількості аналогових давачів. Інформація у запису упакована, тобто в одній комірці може бути кілька елементів. Запис файла аналогових сигналів містить інформацію, що відноситься тільки до одного сигналу і при 16-бітовій розрядній сітці має вигляд, показаний на рис. 3.2.

Но мер  фі- зич-  ної  ко- мір- ки	p	Шифр параметра: КБ, НП, ШЛ, ШВ							1	
	p+1	002	ЦОЗ	0У4	Код параметра				5	
	p+2	Дійсне							6	
	p+3	Значення параметра							7	
	p+4	Нижня межа достовірності 8					Верхня межа достовірності		9	
	p+5	Нижня межа регламенту 10					Верхня межа регламенту		11	
	p+6	ОК 12	Оф 13	НФ 14	ЛТ 15	ОД 16	ОР 17	Номер запису у файлі	Номер елемента у файлі фільтрів	19
	p+7	Номер запису в файлі корекції			Номер запису в файлі керуючих параметрів			Номер запису в файлі ЛТК		22
	p+8	Осереднене дійсне							23	
	p+9	Значення							24	

Рис. 3.2. Структура файла аналогових сигналів

Позначення на рисунку мають такий зміст. Перший елемент запису: КБ — код букви, НП — номер параметра, ШЛ — шифр лінії, ШВ — шифр відділення. Другий елемент: 00 — ознака обробки. Якщо 00 - 1, сигнал не треба обробляти. Елемент 3: ЦО — цикл опитування; елемент 4: ОУ — ознака усередження; якщо ОУ = 1, то розраховується і запам'ятовується усереднене значення параметра, якщо ОУ = 0, то запам'ятовується миттєве значення параметра. Елемент 12: ОК — ознака керуючого параметра; елемент 13: ОФ — ознака фільтрації; якщо ОФ = 1, то потрібна фільтрація дійсного значення (ДЗ) параметра. Елемент 14: НФ — номер формули розрахунку:

якщо  $H\Phi=0$ , то  $DZ=A$ ;  $x+B$

якщо  $H\Phi=1$ , то  $DZ=A$ ;  $x^{(1/2)}+B$

якщо  $H\Phi=2$ , то  $DZ=A$ ;  $x^2+B+C$  (3.1)

якщо  $H\Phi=3$ , то  $DZ=A$ ;  $x^2+Cx+D$

де  $A, B, C$  і  $D$  — коефіцієнти апроксимаційних формул.

Виміряне  $DZ$  видатку газу  $DZ_{\text{вим}}$  коригується за дійсними значеннями температури  $T_d$  та тиску  $P_d$  робочого тіла відповідно до формул:

$$DZ = DZ_{\text{вим}} (K(1,033 + P_d)/(273 + T_d))^{(1/2)}; \\ K = (273 + T_H)/(1,033 + P_H) \quad (3.2)$$

де  $T_H, P_H$  — відповідно температура і тиск робочого тіла, для якого виконувався розрахунок звужуючого пристрою.

Приклад. Визначити дійсне значення видатку, якщо виміряне значення складає 1300 м /год. Використовується гаряче повітря з температурою 1100°C та надмірним тиском 15 Н/мм<sup>2</sup>. Виходячи з відомих  $P_H = 15$  Н/мм<sup>2</sup> та  $T_H = 1100^\circ\text{C}$  проводимо розрахунок:

$$DZ = 1300((273 + 1100)/(1,033 + 15)(1,033 + 15)/(273 + 1100))^{(1/2)} = 1235 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Елемент 15: ЛТ — ознака належності параметра до системи логіко-технологічного контролю. Елемент 16: ОД — ознака достовірності. Якщо ОД = 1, то це означає, що значення вимірюваного коду параметра вийшло за межі достовірності. Елемент 17: ОР — ознака виходу за регламентні межі. Якщо ОР = 1, то це означає, що значення вимірюваного коду параметра вийшло за регламентні межі.

У файлі аналогових сигналів умовно-постійною інформацією вважаються елементи з номерами 1—4, 8—15, 18—22. Їх зміст залежить від результатів опиту технологічних параметрів. Формування цієї інформації здійснюється оператором.

Головна змістовна інформація розміщується в елементах з номерами 5, 6, 7, 16, 17, 23, 24, вона формується задачами опиту і первинної обробки сигналів.

Згідно з ОФ фільтрації підлягають параметри, на дійсні значення сигналів

яких (за технологічними умовами або за умовами передачі інформації) накладається перешкода. Фільтрація виконується за формулою

$$ДЗ_t^\phi = ДЗ_{t-1}^\phi + j (ДЗ_t - ДЗ_{t-1}^\phi), \quad (3.3)$$

де  $ДЗ_t^\phi$ ,  $ДЗ_{t-1}^\phi$ , — фільтровані значення в моменти часу  $t$  та  $t-1$ ;

$ДЗ$ , — поточне значення в момент часу  $t$ ; ( $p$  — ваговий коефіцієнт).

Коефіцієнт  $j$  найчастіше обирається рівним одному з трьох значень: 1; 0,5; 0,25. Коли  $j = 1$ , фільтрація не виконується;  $j = 0,5$  — фільтрація виконується фільтром, який має експоненціальну характеристику, час зникнення перехідного процесу дорівнює п'яти циклам опитування давачів технологічних параметрів;  $j = 0,25$  — фільтрація здійснюється таким самим фільтром, час зникнення перехідного процесу дорівнює дванадцяти циклам опиту.

Незважаючи на порівняно складну фізичну структуру запису, доступ до її елементів на логічному рівні є простим. Наприклад, щоб прочитати номер запису в файлі параметрів, які підлягають логіко-технологічному контролю, достатньо вказати номер файла аналогових сигналів, номер запису та номер елемента.

Функціональну схему інформаційної підсистеми наведено на рис. 3.3. Ця схема відображує послідовність надходження та перетворення інформації. Елементами схеми (блоками) є джерела вхідної інформації — зовнішні пристрої технічних засобів АСКТП, дані, програми вводу, переробки та виводу інформації, вихідні документи та сповіщення. Лінії, що з'єднують блоки, — це зв'язки, які показують напрям руху інформації.

Відповідно до ієрархічно впорядкованого принципу структурного проектування (коротко: ієрархія — ввід — обробка — вивід), який дуже широко застосовується при проектуванні АСКТП, програмне забезпечення інформаційної підсистеми розподіляється на такі групи.

Програми вводу інформації до керуючого обчислювального комплексу (КОК):

1. Програма опитування аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), до входів яких підключені давачі аналогових сигналів. Внаслідок роботи цих програм відбувається ввід кодів значень технологічних параметрів в КОК та

розміщення їх в БД.

2. Програма опитування перетворювачів число-імпульсної інформації (ПЧІ), до входів яких підключені давачі число-імпульсних сигналів (в основному давачі видатків). Програма здійснює ввід та розміщення цієї інформації в БД.

3. Програма опитування перетворювачів дискретної (двопозиційної) інформації (ПДІ). За допомогою цієї програми здійснюється ввід в БД відомостей про стан технологічного устаткування.

4. Програма обслуговування запитів пульту програміста (ПП), за допомогою якої здійснюється періодичне занесення необхідної умовно постійної інформації в БД, а також ввід результатів лабораторних аналізів, величин планових завдань та ін.

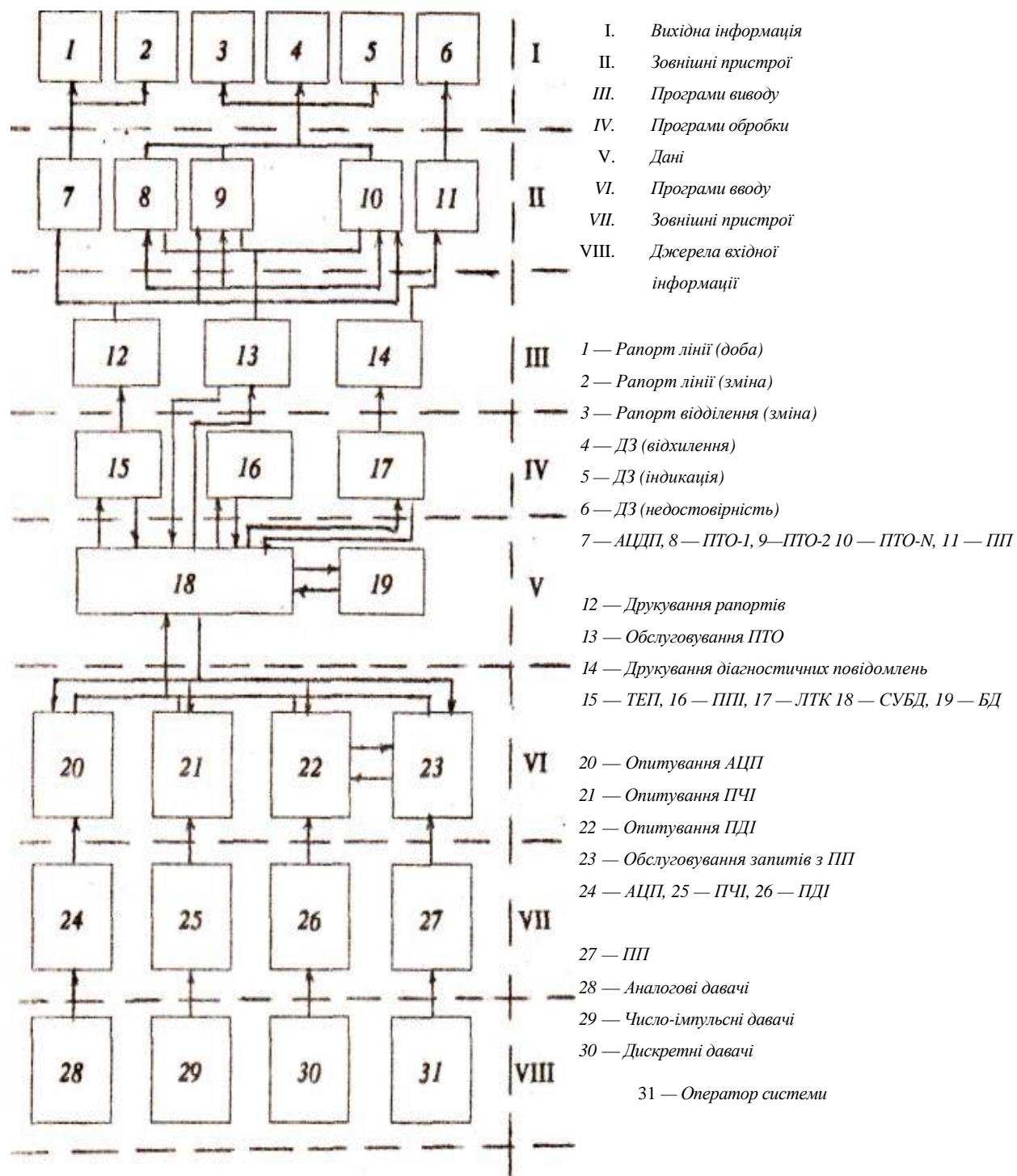


Рис. 3.3. Функціональна схема інформаційної підсистеми

Програми обробки інформації:

1. Програма первинної переробки інформації (ППІ), з її допомогою здійснюється перетворення кодів параметрів в дійсні значення, перевірка на межеві значення кодів дійсних значень параметрів, а також фільтрація, масштабування та



внесення необхідних виправлень.

2. Програма формування техніко-економічних показників, за допомогою якої виконується розрахунок та накопичення ТЕП за зміну та добу.
3. Програма логіко-технологічного контролю (ЛТК) достовірності інформації, що надходить в БД від давачів.

Програми виводу інформації:

1. Програми друкування рапортів роботи за зміну технологічних відділень, які містять інформацію про дійсні та осереднені за годину (по видатках) значення технологічних параметрів. Ця інформація видається на пульт технолога-оператора (ПТО).
2. Програми друкування рапортів роботи за зміну та добу технологічної лінії (цеху). Друкується інформація про основні ТЕП, вона видається на алфавітно-цифровий друкуючий пристрій (АЦДП).
3. Програми обслуговування ПТО, які дозволяють видавати на пристрій візуалізації, а також інші засоби індикації та сигналізації, якими обладнаний ПТО, інформацію про дійсні значення та відхилення від регламентних значень будь-яких технологічних параметрів відділення.
4. Програми друкування діагностичних повідомлень про недостовірні значення технологічних параметрів. Ця інформація формується програмами ЛТК.

Робота інформаційної підсистеми КОК відбувається під керуванням операційної системи реального часу, яка реалізує мультизадачний обчислювальний процес у багатоспоживацькому режимі. Перелічені програми є елементами ОС-задач інформаційної підсистеми, до розгляду деяких з них ми і перейдемо.

### **3.1.2. Основні задачі Інформаційної підсистеми**

Задача опитування АЦП

При виконанні цієї задачі проводиться опитування за часом аналогових давачів, які підімкнені через індивідуальні перетворювачі, групові перетворювачі та комутатори до входів АЦП. Незалежно від типу АЦП, який використовується для

вводу аналогових сигналів, двійкові коди кожного опитуваного давача знаходяться у діапазоні

-  $2^{I1} \dots + 2^{I2}$  і відповідають напрузі постійного струму на вході АЦП

- 10В...+10 В. У діалозі з споживачем задача настроюється на потрібну кількість групових та індивідуальних перетворювачів, а також комутаторів. Задача працює з логічними номерами пристроїв і таким чином не залежить від способу та місця підімкнення пристрою вводу до обчислювального комплексу. Під час роботи задачі проводиться реєстрація збійних ситуацій, що виникають у процесі опитування давачів. Одержані в результаті опитування давачів двійкові коди вносяться в БД в організаційний файл аналогових сигналів. Задача є циклічною, частота роботи задається користувачем.

#### Задача опитування ПЧІ

Проводиться опитування за часом давачів число-імпульсних сигналів. Інформація на виході перетворювачів являє собою 15-розрядний двійковий код, який заноситься в БД. Збійні ситуації, що виникають у процесі опитування, реєструються. Опитування здійснюється на логічному рівні з використанням керуючих програм (драйверів), відповідних пристроїв зв'язку КОК з об'єктом. Передбачається попереднє настроювання задачі споживачем на потрібну кількість давачів та частоту роботи.

#### Задача ППП

При виконанні задачі в циклічному режимі здійснюється така обробка вимірюваних значень (кодів) сигналів від давачів.

1. Масштабування кодів вимірюваних значень технологічних параметрів, тобто перетворення кодів у дійсні значення залежно від типу шкали давача (формули (3.1)), присвоювання результатам відповідних розмірностей.
2. Контроль вимірюваних значень на достовірність шляхом перевірки їх на відповідність можливим робочим межам (межі достовірності) . Вихід за ці межі реєструється в БД у записі відповідного параметра.
3. Контроль вимірюваних значень на відповідність регламентним межам, тобто нижнім та верхнім межам, обумовленим конкретною технологією. Вхід за межі

реєструється в БД у записі відповідного параметра.

4. Цифрова фільтрація (згладжування) вимірювань для виділення корисного сигналу на фоні завад (часто високочастотних).
5. Корекція значень видатків матеріальних потоків за тиском та температурою. Вона обумовлена відхиленням робочих (дійсних) значень температури та тиску від значень, використаних при розрахунку діафрагми.
6. Усереднення вимірюваних значень параметра за формулою

$$DZ_n^C = DZ_{n-1}^C + 1/n(DZ_n - DZ_{n-1}) \quad (3.4)$$

де  $DZ_n$ ,  $DZ_{n-1}$  — вимірювані значення параметра на  $n$ -му та  $(n-1)$ -му циклах опитування;  $DZ_n$  — усереднене значення, розраховане на  $(n-1)$ -му циклі:  $n$  — число циклів, на якому виконується усереднення.

Задача обслуговування пультів технолога-оператора.

Забезпечується контроль за ходом технологічного процесу, вивід інформації про стан параметрів технологічного процесу на пульті за вимогами технологів-операторів, обслуговування робочих місць технологів-операторів, видача сповіщень про помилки в діях операторів та при функціонуванні задачі. Задача працює в діалоговому режимі через систему питань та відповідей, що вводяться з пультів (дисплейних модулів). Передбачено обслуговування терміналів у квазіпаралельному режимі, тобто можливе ведення діалогів з технологами одразу з декількох пультів. Задача обслуговування ПТО є сегментованою, вона складається з головної програми і виконавчих сегментів. Головна програма є ОЗП-резидентною, а виконавчі сегменти є диск-резидентними. Головна програма забезпечує сервісні функції та обробку команд технологів-операторів. Виконавчі сегменти призначені для формування відповідей технологам-операторам після закінчення діалогів, які ведуться головною програмою. Якщо будь-яка функція, що визивається для виконання, не потребує діалогу, виконавчий сегмент викликається негайно і робить візуалізацію необхідної інформації на екрані терміналу. Функції, що виконуються сегментами, можуть бути такими: видача на екран поточних часу і дати, вивід дійсних значень групи параметрів, вивід дійсного значення одного параметра, індикація відхилення параметрів за регламентні межі. Всю необхідну інформацію як головну програму,

так і виконавчі сегменти одержують через спеціальні обслуговуючі програми доступу із БД.

Задача логіко-технологічного контролю.

Інформаційна підсистема АСКТП є багатофункціональною. В рамках цієї підсистеми вирішуються, з одного боку, задачі, пов'язані з контролем за ходом технологічного процесу, а з другого — задачі формування інформаційного забезпечення для керуючої підсистеми. У зв'язку з цим особливе значення має надійний контроль достовірності значень параметрів.

Дві важливі по суті, але тривіальні за методикою реалізації функції контролю виконують задачі опитування ПШ: контроль надходження коду параметра від давача на вхід системи і контроль коду параметра на потрапляння в межі можливих значень. Третя функція — логіко-технологічний контроль (ЛТК) достовірності параметрів, який виконується над їх послідовностями. ЛТК є логічним продовженням перших двох функцій контролю, за його допомогою повинні виявлятися помилки у визначенні дійсних значень технологічних параметрів у тих випадках, коли це можливо лише шляхом порівняльного аналізу. Практика експлуатації систем керування показала, що необхідність в проведенні ЛТК досить велика. Так, видаткомір реєструє цілком "задовільне" значення, що потрапляє в достатньо вузькі, технологічно достовірні межі, однак дійсне значення все-таки є помилковим з тієї чи іншої причини, яка виникла у вимірювальному тракті.

Під послідовністю розуміють ряд однорідних технологічних параметрів, що розміщені в черзі зменшення їх дійсних значень. На основі аналізу функціонування технології майже завжди можна скласти послідовність зменшування дійсних значень однорідних параметрів типу:

$$T_1 \rangle T_2 \rangle \dots \rangle T_m ; P_1 \rangle P_2 \rangle \dots \rangle P_n \text{ та ін..}$$

Задачею ЛТК є проведення послідовного складання та перевірки виконання кожної з таких залежностей на основі інформації, що міститься в БД.

Для проведення ЛТК необхідно, щоб кожний параметр описувався в БД двома характеристиками: номером послідовності, у перевірці якої він бере участь, та порядковим номером розміщення усередині певної послідовності. При наявності

даної інформації задача ЛТК виконує такі дії:

1. Вибирає номер послідовності, що перевіряється.
2. Формує саму послідовність.
3. Обчислює бал достовірності для членів послідовності за формулами:

$$A_i = \sum_{k=1}^N Y_{ik}, i = \overline{1, N}, \quad (3.5)$$

де  $A_i$  — бал достовірності  $i$ -го члена послідовності;  $N$  — кількість членів послідовності.

$$y_{ik} = \text{sgn}\{(x_i - x_k + d_{ik})(k - i)\}, \quad (3.6)$$

$$d_{ik} = d_{\text{sgn}}\{i - k\}. \quad (3.7)$$

Тут  $x_i(x_k)$  — дійсне значення  $i$ -го ( $k$ -го) параметра, причому номери членів послідовності збільшуються у алфавітному порядку:  $d$  — зона нечутливості для даної послідовності, для послідовностей без урахування зони нечутливості  $d = 0$ .

4. Проводиться пошук члена послідовності, що має мінімальний бал достовірності  $A_{i\min}$ . Якщо  $A_{i\min} = N$ , то всі параметри послідовності визначаються достовірними. При

$$A_{i\min} < N \text{ та } A_{i\min} \neq A_j (j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N) \quad (3.8)$$

$i$ -й параметр визнається недостовірним.

Тип послідовності параметрів, що належать ЛТК, та величини зони нечутливості визначають із таких міркувань. Для кожної формованої послідовності із практики функціонування даної технології визначається мінімальна різниця  $B$  значень двох суміжних параметрів. Одержана різниця значень ( $B = x_1 - x_2$ ) розглядається як реалізація нормально розподіленої випадкової величини з такими параметрами:

математичне сподівання  $m = B/2$ ;

середньоквадратичне відхилення  $s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$ .

Величина  $s_i$  ( $i=1,2$ ) визначається за формулою

$$s_i(1/3)((a_i \Pi_i)/100), \quad (3.9)$$

де  $a_j$  — відносна похибка вимірювального тракту, %;  $\Pi_i$  — шкала вимірювання у відповідних одиницях. Якщо станеться, що

$$\Phi(B/2s) \geq 1 - P_0, \quad (3.10)$$

де  $\Phi(.)$  — табличне значення інтеграла ймовірності нормованої гаусової випадкової величини;  $P_0$  — задана ймовірність одержання повідомлення про недостовірність значення параметра, в той час як значення є достовірними ( $P_0 = 0,05$  —  $0,01$ ), то перевірку виконання логіки послідовності можна проводити без урахування зони нечутливості.

Якщо нерівність (ЗЛО) не виконується, то для забезпечення виконання заданої  $P_0$  визначається величина  $s_H$  зони нечутливості у нормованому вигляді:

де  $x_0$  визначається за виразом

$$d_H = x_0 - (B/2d), \quad (3.11)$$

Величина зони нечутливості в одиницях вимірювання параметра визначається шляхом зворотного переходу за виразом

$$\Phi(x_0) = 1 - P_0, \quad (3.12)$$

Таким чином, під зоною нечутливості розуміють число, на яке необхідно підсилити нерівність для забезпечення заданої  $P_0$ .

Приклад. Температура реакції у колоні синтезу аміаку умовно може бути поділена на п'ять зон. Вона змінюється по зонах у таких межах ( $^{\circ}\text{C}$ ):  $T_{x_1} = 400 \dots 440$ ,  $T_{z_2} = 460 \dots 550$ ,  $T_{z_3} = 570 \dots 630$ ,  $T_{z_4} = 650 \dots 700$ ,  $T_{z_5} = 720 \dots 750$ . Мінімальна різниця значень двох суміжних параметрів ( $B$ ) встановлена  $20^{\circ}\text{C}$ ;  $a_1 = 2$ ;  $\Pi_1 = 500$ ,  $\Pi_2 = 600$ ,  $\Pi_3 = 650$ ,  $\Pi_4 = 750$ ,  $\Pi_5 = 800^{\circ}\text{C}$ . Обираємо величину  $P_0 = 0,05$ .

З бази даних, відповідно до номера послідовності і порядкового номера параметра в ній, формуємо послідовність дійсних значень температур  $T_{z_j} = T_{z_5}$  у черзі зменшення. Припустимо, що внаслідок чергового вимірювання одержані такі дійсні значення:  $T_{z_j} = 440$ ,  $T_{z_2} = 615$ ,  $T_{z_3} = 600$ ,  $T_{z_4} = 670$ ,  $T_{z_5} = 720$ . Послідовність

набуває вигляду:

$$720 > 670 > 600 > 615 > 440.$$

Температура  $T_{z_2}$  заздалегідь є недостовірною. Проведемо аналіз зон чутливості  
 $m = B/2 = 20/2 = 10$ .

Для п'ятої зони:

$$\begin{aligned}s_1 &= 1/3(2 \cdot 180/100) = 5,33; \\ s_2 &= 1/3(2 \cdot 750/100) = 5; \\ s_5 &= \sqrt{5,33^2 + 5^2} = 7,30; \\ B/2s &= 20/(2 \cdot 7,30) = 1,37; \\ \Phi_5(1,37) &= 0,41 < 1 - P_0 = 0,95.\end{aligned}$$

Аналогічно маємо:

$$\begin{aligned}s_4 &= 6,61; \Phi_4(1,512) = 0,43 < 0,95 \\ s_3 &= 5,89; \Phi_3(1,697) = 0,45 < 0,95; \\ s_2 &= 5,20; \Phi_2(1,920) = 0,47 < 0,95; \\ s_1 &= 4,70; \Phi_1(2,127) = 0,48 < 0,95.\end{aligned}$$

Співвідношення  $\Phi(B/2s) \geq 1 - P_0$  не виконується, тому перейдемо до розрахунку величини зони нечутливості:

$$x_0 = 3,92, \text{ знаходимо } s_{5H} = 3,92 - 1,37 = 2,550.$$

$$\text{Аналогічно: } <5_{4H} = 2,408; <5_{3H} = 2,223; <5_{2H} = 2,000; <5_{1H} = 1,793.$$

Величина зони нечутливості:

$$d_5 = 3,92 - 20/2 = 18,61; <d_4 = 15,91; <d_3 = 13,08; <d_2 = 10,38; <d_1 = 8,42.$$

Переходимо до розрахунку балів достовірності:

$$Y_5 = \text{sgn}[(720 - 670 + 18,61) \cdot (2 - 1)]$$

Значення виразу в дужках  $[\ ]$  0, значить  $Y_5 = 1$  (інакше  $Y_5 = 0$ ).

Аналогічно:

$$\begin{aligned}Y_4 &= \text{sgn}[(720 - 600 + 18,61) \cdot (3 - 1)], Y_4 = 1; \\ Y_3 &= \text{sgn}[(720 - 615 + 18,61) \cdot (4 - 1)], Y_3 = 1; \\ Y_2 &= \text{sgn}[(720 - 440 + 18,61) \cdot (5 - 1)], Y_2 = 1.\end{aligned}$$

Розраховуємо  $A_j$ :  $A_5 = 4$ ;  $A_4 = 4$ ;  $A_3 = 4$ ;  $A_2 = 3$ ;  $A_1 = 4$ ;  $A_{\min} = 3$ . Використовуючи співвідношення  $A_{\min} < N$  та  $A_{\min} \neq A_j$  ( $j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N$ ), параметр з  $A_2 = 3$

визначається недостовірним. Цим параметром є температура  $T_3$ .

### **3.2. Проектування та розробка програмного забезпечення керуючого режиму АСКТП**

#### **3.2.1. Призначення та алгоритм функціонування керуючої підсистеми**

Керуючий режим в АСКТП реалізується за допомогою керуючої підсистеми. Ця підсистема виконує такі функції:

- аналіз технологічного процесу, розрахунок рекомендованих (статично-оптимальних відповідно до обраного критерію) значень параметрів вектора керування;

- реалізація керуючих діянь шляхом видачі корекцій до завдань локальних контурів керуванні (супервізорний режим) або шляхом видачі керуючих діянь безпосередньо на виконуючі механізми (режим прямого цифрового керування (ПЦЮ));

- контроль та керування реалізацією керуючих діянь з боку обслуговуючого персоналу;

- контроль, сигналізація та автоматичне усунення передаварійних ситуацій;

- оперативне інформування обслуговуючого персоналу про збої у роботі програмного забезпечення підсистеми та порушення у роботі технічних засобів системи.

Організаційним центром підсистеми є файл керуючих параметрів (КФ). Файл складається з повідомлень, кожне з яких містить інформацію про один керуючий параметр. Одне повідомлення розміщується в шести комірках пам'яті і має такі основні ознаки:

- НП, ІПЛ, ІШВ — вже відомі ознаки параметра, лінії, відділення;

- Д1 — ознака дозволу (заборони) технологом-оператором відділення на вироблення рекомендації про значення параметра (О — дозвіл, 1 — заборона);

- Д2 — ознака дозволу (заборони) технологом-оператором відділення на реалізацію рекомендації в замкненому контурі керування параметром;



ОВ — ознака відповіді технолога-оператора відділення на рекомендацію, розраховану модулем вироблення рекомендацій (О — з рекомендацією згоден, 1 — не згоден);

ОР — ознака режиму роботи програм вироблення та реалізації керуючих діянь (два біти):

О — вироблення рекомендацій (режим "рада"), 1 — вироблення рекомендацій і обов'язкова їх видача технологу-оператору відділення (режим "рада з сигналізацією"), 2 — вироблення рекомендацій, обов'язкова їх видача технологу-оператору відділення і автоматична реалізація в замкненому контурі керування при згоді технолога-оператора (режим "керування з сигналізацією"), 3 — вироблення рекомендацій з автоматичною їх реалізацією в замкненому контурі (режим "керування");

ДР — ознака достовірності рішення задачі про значення керуючого параметра (О — задача вирішується, необхідна інформація є достовірною, 1 — задача не вирішується через недостовірність інформації);

ДП — ознака достовірності повідомлення (О — контрольна сума не порушена, 1 — контрольна сума порушена);

ШМ - шифр керуючого модуля, ціле шістнадцятерічне число (0-F);

ЗП — рекомендоване значення параметра, яке виробляється керуючим модулем, а також при режимі роботи  $P1 = 1$ ,  $P2 = 0$  — технологом-оператором і введено з ПТО;

КС — контрольна сума повідомлення, являє собою результат циклічного підсумовування вмісту комірок  $(P + 0) \dots (P + 4)$ , сума міститься в комірці  $(P + 5)$ .

Перейдемо до розгляду питання про функціонування програм керуючої підсистеми. Схему функціонування підсистеми показано на рис. 3.4.

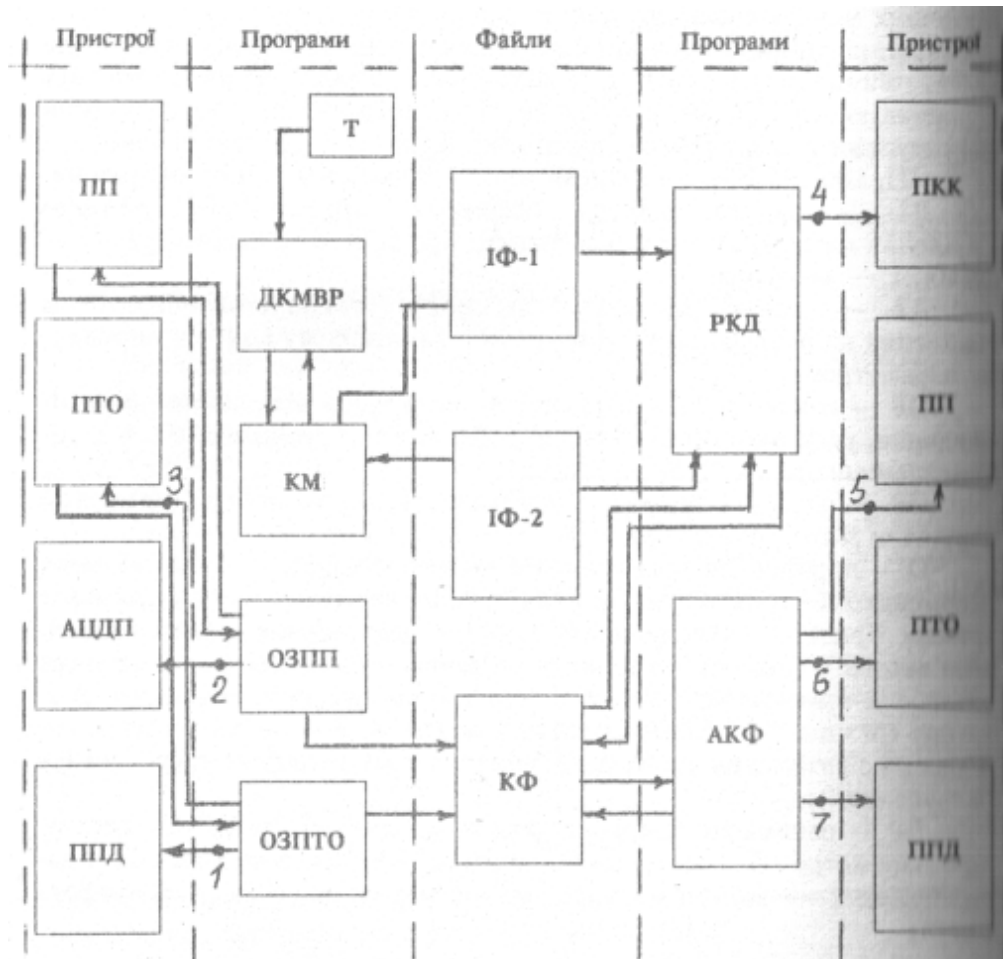


Рис. 3.4. Схема функціонування керуючої підсистеми

Пояснення до рисунку:

ПП — пульт програміста; ПТО — пульт технолога-оператора; АЦДП — алфавітно-цифровий друкуючий пристрій; ППД — пристрій послідовного друку; Т — таймер; ДКМВР - диспетчер керуючих модулів вироблення рекомендації; КМ — керуючі модулі; ОЗПП — обслуговування запитів з пульта програміста; ОЗПТО — обслуговування запитів з пульта технолога-оператора; ІФ-1 — файл миттєвих значень технологічних параметрів; ІФ-2 — файл усереднених значень технологічних параметрів; КФ — файл керуючих параметрів; РКД — реалізація керуючих діянь; АКФ — аналіз файла керуючих параметрів; ПКК — пристрій кодового керування, (1) — вивід рекомендації, вивід інформації про стан керуючих параметрів; (2) —

друкування вмісту КФ; (3) — вивід значень параметрів на дисплей; (4) — видача керуючих діянь в супервізорному режимі або в режимі ПЦК; (5) — видача інформації про недостовірність параметрів, порушення роботи пристроїв, порушення контрольних сум; (6) — сигналізація про видачу рекомендацій; (7) — реєстрація дій обслуговуючого персоналу при роботі з керуючою підсистемою, реєстрація рекомендацій.

Програма ДКМВР здійснює запуск у роботу модулів вироблення рекомендацій. Програми запускаються по таймеру із заданим інтервалом. Робота синхронізується з надходженням до системи нової інформації. Кожний з модулів КМ вирішує свою функціональну задачу відповідно до існуючого алгоритму за умови  $D1 = 0$ . Якщо рішення не може бути отримане (недостовірна інформація ІФ1, ІФ2), модуль заносить  $ДР = 1$  у відповідне повідомлення файлу КФ.

Програми РКД складаються з модулів, кожний з яких вирішує свою задачу з урахуванням динаміки контура або зв'язаних контурів регулювання. Модулі запускаються на виконання циклічно відповідно до заданого періоду. Реалізація керуючих діянь виношується одним з модулів при наявності дозволу з боку технолога-оператора на роботу в замкненому контурі керування.

Програма ОЗПП запускається на виконання за вимогою оператора системи. При роботі керуючої підсистеми оператор має право виконувати оперативний аналіз стану підсистеми та друкування вмісту файлу КФ на АЦДП. За спеціальним запитом оператор системи має також право вводити зміни в КФ шляхом запису нового повного повідомлення.

Програма ОЗПТО дозволяє технологам-операторам відділень працювати з керуючою підсистемою. При цьому технолог-оператор відділення може виконувати такі операції:

- 1) виводити на дисплей ПТО рекомендоване системою значення керуючого параметра (ЗП);
- 2) виводити ЗП на пристрій друкування відділень;

3) виводити на пристрій друкування повну інформацію про стан керуючих параметрів відділення;

4) виконувати контроль та керування роботою керуючої підсистеми за кожним параметром (дозвіл-заборона режиму "рада") та керування в замкненому контурі;

5) проводить одночасну (аварійну) заборону вироблення рекомендацій та реалізації керування по всіх параметрах відділення. За цією командою всім повідомленням керуючого файла надається значення  $P1 = 1$ ,  $P2 = 1$ .

Програма АКФ виконує функції контролера файла КФ та диспетчера виводу на зовнішні пристрої системи інформації, що надходить в КФ. Програма запускається на виконання циклічно, по таймеру. Вона формує КС повідомлень КФ та контролює ці суми, реєструє внесення змін в КФ та формує повідомлення про виконання цієї роботи. Програма виводить таку інформацію:

1) реєстрація діалогу технологів-операторів керуючою підсистемою;

2) у режимах  $OP = 1$  або  $OP = 2$  при надходженні нового значення рекомендації на ППД відділення друкується час цього надходження і вмикається сигналізація на ПТО для виклику технолога-оператора. Якщо ця інформація не може бути виведена на ППД через відмови пристрою чи з інших причин, то вона виводиться на ПП оператору системи;

3) вивід на ПП повідомлень про порушення в роботі керуючої підсистеми у випадках порушення КС повідомлення; при надходженні інформації про недостовірність параметрів, необхідних для вироблення рекомендацій.

### **3.2.2. Реалізація керуючих діянь в контурі ПЦК**

Введемо такі позначення:  $X_{\Pi}$  — поточне значення параметра;  $U_c$  — задане значення регульованого параметра, що використовується в режимі стабілізації;  $U_k$  — задане значення регульованого параметра, що використовується в режимі каскадного керування;  $U_H$  — номінальне значення регульованого параметра за технологічним регламентом;  $U_M$  — оптимальне значення регульованого параметра,

розраховане в керуючих модулях;  $Y_B$  — вихідна величина верхнього каскаду керування.

У контурах ПЦК для формування заданих значень регульованих параметрів реалізується, як правило, три режими: ДК — дистанційне керування; С — стабілізація (задане значення встановлюється на нижньому рівні); К — каскадне керування (задане значення регульованої-величини передається з верхнього рівня). При цьому можуть бути реалізовані наступні варіанти схеми керування:

1) одноконтурна, в якій при ввімкненні режиму К значення  $U_H$  (або  $U_M$ ) використовується як завдання у режимі С, після чого контур повертається до режиму С;

2) одноконтурна, що відрізняється від попередньої тим, що при ввімкненні режиму К номінальне (або оптимальне) значення змінюється за періодичним законом. Режим С відновлюється, якщо  $U_K - U_C < 0,1\%$ ;

3) одноконтурна, в якій при режимі К використовується безперервно  $U_M$ ;

4) двоконтурна динамічна, в якій при ввімкненні режиму К для нижнього контура завдання передається з верхнього контура; при роботі нижнього в режимах С та ДУ для забезпечення безударного переходу на режим К вихід верхнього контура  $Y_B$  прирівнюється до нижнього  $U_C$ . Способи формування заданого значення регульованого параметра наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Значення регульованого параметра

Режим	$U_C$	$U_K$	Номер варіанта схеми
ДК	$U_C - X_{II}$	$U_K - U_H$ або $U_K - U_M$	1 — 3
ДК	$U_C - X_T$	$U_K - U_H$ або $Y_B - U_M$	
С	$U_C$	$U_K - U_H$ або $U_K - U_M$	1 — 3
С	$U_C$	$U_K - U_H, U_B - U_K$	
К	$(U_C - U_K)^*$	$U_K - U_H$ або $U_K - U_M$	1
К	$(U_C - U_K)^{**}$	$U_K - U_M$	3
К	$(U_C - U_K)^{**}$	$U_K - Y_B$	

Розглянемо позиційний та швидкісний алгоритми ПЦК. Рівняння безперервного ПД-регулятора має вигляд:

$$(3.14)$$

де  $K_n$  — коефіцієнт передачі;  $T_1$  — постійна інтегрування;  $T_d$  — постійна диференціювання;  $e(t) = X_T(t) - U_C(t)$  — сигнал помилки.

Його дискретний аналог (період квантування  $T_0$  при використанні методу трапецій для інтегрування має вигляд:

$$U(k) = K_n \left[ e(k) + T_0 / T_1 ((e(0) + e(k)) / 2 + \sum_{i=1}^{k-1} e(i)) + T_d / T_0 [e(k) - e(k-1)] \right] \quad (3.15)$$

Рівняння (3.15) відображує нерекурентний алгоритм, тому що в ньому для формування суми треба пам'ятати всі попередні значення сигналу помилки. Оскільки значення  $U(k)$  розраховується щоразу, такий алгоритм називають також позиційним. Однак для програмування більш зручним є рекурентний алгоритм, в якому для розрахунку використовується значення  $U(k-1)$ :

$$U(k-1) = K_n \left[ e(k-1) + T_0 / T_1 ((e(0) + e(k-1)) / 2 + \sum_{i=1}^{k-2} e(i)) + T_d / T_0 [e(k-1) - e(k-2)] \right] \quad (3.16)$$

$$\text{Тоді } \Delta U_k = U(k) - U(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-1),$$

$$\begin{aligned} q_0 &= K_n (1 + T_0 / (2T_1) + T_d / T_0); \\ \text{де } q_1 &= -K_n (1 + 2T_d / T_0 - T_0 / (2T_1)); \\ q_2 &= K_n T_d / T_0; \end{aligned} \quad (3.17)$$

Оскільки тепер розраховується тільки поточне  $\Delta U_k$ , яке відображує динаміку керування, такий алгоритм називається швидкісним. Для малих  $T_0$  величини  $q_1$ ,  $q_2$  та  $q_3$  можна обчислювати, використовуючи значення  $K_n$ ,  $T_1$ ,  $T_d$  аналогового ПД-регулятора. їх звичайний діапазон:

$$K_n = 0,01 - 99, T_1 = 0,01 - 99 \text{ хв.}, T_d = 0 - 99 \text{ хв.}$$

Якщо вважати швидкісний алгоритм (3.17) умовно ПД-1, то можна розглянути ще кілька його модифікацій.

1. ПД-2, залежно від сигналу помилки  $e(k)$  виконується включення або виключення інтегральної складової. Якщо абсолютна величина  $e(k)$  менше деякого, ПД-1, якщо більше або дорівнює ПД-регулювання.

2. ПД-3, коли величина пропорційної складової залежить від квадрата помилки.

3. ПД-4, коли величина інтегральної складової залежить від квадрата помилки.

4. ПД-5, де модифікація полягає в різних способах реалізації диференціальної складової. Введення її в алгоритм може бути небажаним, якщо сигнал помилки вміщує високочастотний шум, що може призвести до різких коливань керуючого діяння. Щоб цього уникнути, співвідношення  $T_d/T_0$  обирається меншим від його номінальної величини. Інший шлях полягає в тому, щоб згладити диференціальні властивості алгоритму, використовуючи чотири послідовні значення сигналу помилки:

$$\bar{e}(k) = 1/4[e(k) + e(k+1) + e(k-2) + e(k-3)], \quad (3.18)$$

### 3.3. Підвищення ефективності розробки ПЗ АСКТП

Із збільшенням кількості розроблених АСКТП та поширенням їх функцій стала очевидною необхідність створення модульної структури: програмне забезпечення почали виготовляти у вигляді окремих функціонально завершених елементів — програмних модулів (ПМ), з яких можна збирати ПЗ конкретних систем керування. Далі реалізація такого підходу призвела до створення пакетів прикладних програмних модулів (ПППМ). PPPM визначається як сукупність ПМ з такими властивостями: функціональна повнота, яку в даному разі розуміють як можливість вирішення задачі, що має самостійне функціональне значення; замкненість за вхідною мовою, тобто можливість формулювання задачі у термінах мови пакету без використання інших мов програмування; можливість налагодження на конкретне використання. У простішому випадку пакет являє собою комплекс програмних засобів, створених на універсальних мовах програмування і розміщених у бібліотеці обчислювального комплексу на машинних носіях. Споживач сам вибирає необхідні модулі та формує варіант пакету для своєї задачі.

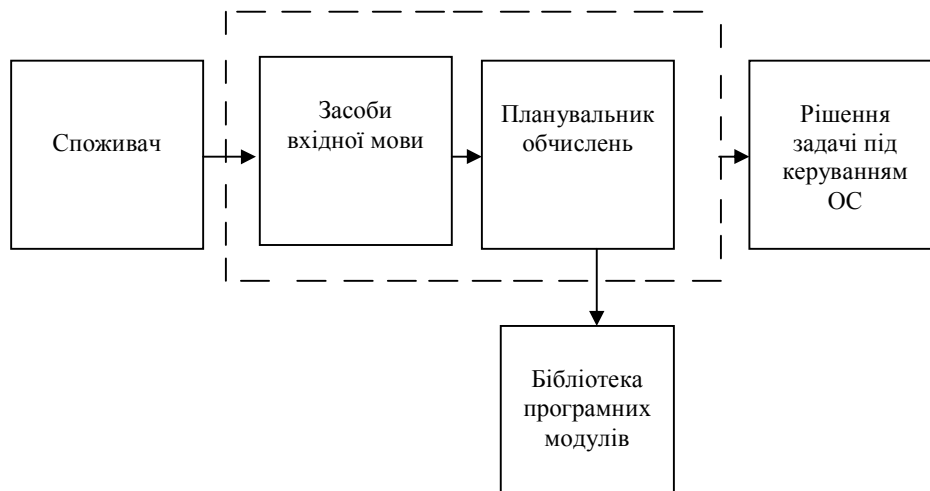


Рис. 3.5. Керування ПППМ за допомогою планувальника обчислень

Наступним етапом у розвитку організації пакетів стало введення процедурно-орієнтовного рівня рішення та використання інструментальних засобів, що дає можливість споживачу за допомогою вхідної мови більш високого рівня описати свою задачу у так званій канонічній формі (рис. 3.5). Програма планувальних обчислень за цим описом здійснює вибір необхідних ПМ з бібліотеки та встановлює послідовність їх виконання.

Подальшим розвитком роботи з ПППМ став діалоговий монітор, що надає споживачеві більш гнучкі засоби керування процесом розв'язку задачі: вибір методу рішення; вибір відповідних ПМ; налагоджування параметрів та обмежень; завдання умов закінчення обчислень (рис. 3.6).

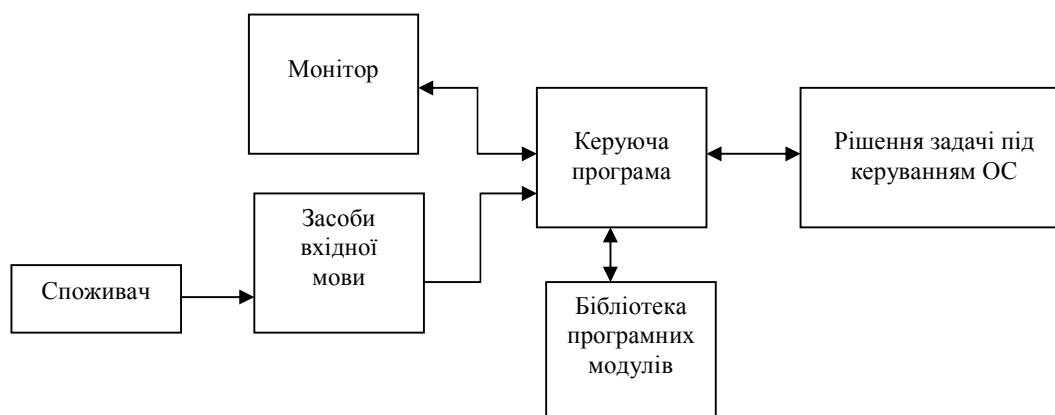


Рис. 3.6. Діалоговий монітор у роботі з ПППМ



Наступним кроком удосконалення технології виготовлення ПЗ АСКТП стало створення систем генерації програмного забезпечення. Головною задачею системи генерації у ПЗ є автоматична компоновка з окремих незалежних модулів програми, що реалізує заданий набір функцій. Цей процес може здійснюватися з використанням двох альтернативних підходів. Перший підхід передбачає наявність двох ЕОМ — інструментальної та об'єктної. Другий підхід базується на концепції єдності інструментальної та об'єктної машин і має ряд переваг перед першим, серед яких найважливішими є однотипність операційних систем та суттєво полегшена адаптація створюваного ПЗ до реальних умов функціонування АСКТП. Зупинимось коротко на складі та функціях засобів, що дозволяють реалізувати на практиці другий підхід. Організаційно-логічну схему автоматизованого синтезу та функціонування автоматизованої системи вироблення керувань (АСВК) у складі АСКТП зображено на рис. 3.7.

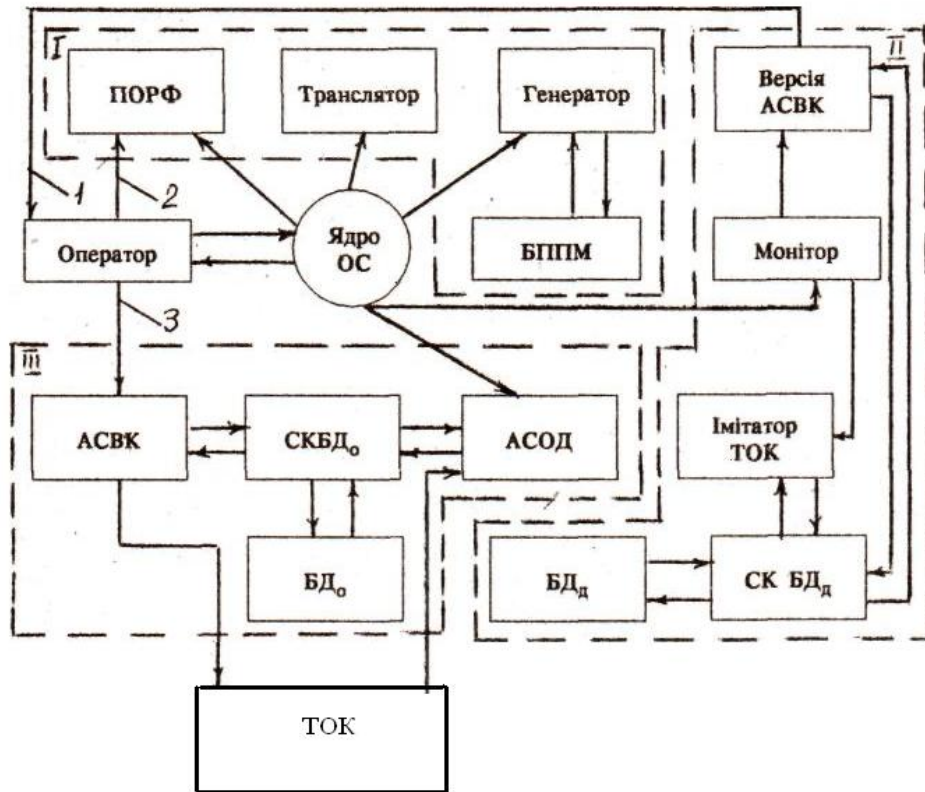


Рис. 3.7. Організаційно-логічна схема автоматизованого синтезу та функціонування АСВК у складі АСКТП: I — синтезуючий комплекс; II — моделюючий комплекс; III — керуючий комплекс; 1 — результат моделювання; 2 — завдання; 3 — успіх

Ця схема відображує як процедуру синтезу ПЗ в динаміці, так і взаємодію окремих частин АСКТП у процесі функціонування. Оператор, взаємодіючи з ядром ОС, ініціює роботу окремих ланок системи у необхідній часовій послідовності. Усі програмні складові схеми можуть бути умовно поділені на три частини: синтезуючий комплекс, моделюючий комплекс та керуючий комплекс. Кінцевою метою функціонування засобів синтезуючого та моделюючого комплексів є створення керуючого комплексу. Керуючий комплекс складається з розроблюваного пакету програм АСВК та стандартних засобів керування ОЗП — резидентною БД — СУБДО та автоматизованої системи обробки даних АСОД. Оператор системи, використовуючи вхідну мову

синтезуючого комплексу та пакет програм обслуговування і редагування файлів (ПОРФ) підготовляє завдання до синтезу окремих керуючих модулів або АСВК в цілому. Транслятор синтезуючого комплексу переводить завдання з вхідної мови у послідовність кодів, яка сприймається генератором керуючих модулів, що входить до складу синтезуючого комплексу. Генератор відповідно до одержаного завдання, використовуючи бібліотеку ППМ (БПТІМ), формує потрібну конфігурацію керуючих модулів або АСВК. Сформований таким чином результат є вихідним для моделюючого комплексу. Моделюючий комплекс призначений для всебічного тестування керуючих модулів або АСВК в цілому. Центральною керуючою програмою моделюючого комплексу є монітор. Монітор координує взаємодію окремих програмних систем між собою у потрібному масштабі часу (реальному, уповільненому або прискореному).

Взаємодія керуючих модулів (або АСВК) з цифровим імітатором ТОК відбувається з використанням засобів системи керування диск-резидентною базою даних (СУБДд). Імітатор виконаний так, що дозволяє оперативно засобами СУБДд задавати та змінювати конфігурацію ТОК або тієї його частини, яка необхідна для тестування керуючого модуля. Всі характеристики і топологія ТОК задаються у БДд. Результати моделювання (таблиці, графіки) передаються на аналіз оператору системи. Оператор системи аналізує результати моделювання, робить висновок про успішність синтезованого варіанта. У випадку, коли результати моделювання визначаються успішними, керуючі модулі включаються до складу АСВК. Інакше у вихідне завдання вноситься корекція, і синтез модулів керування повторюється.

Розглянута схема відображує найбільш прогресивну сучасну технологію автоматизованого проектування програмного забезпечення (САПР ПЗ АСКТП).

### **3.4. Технічні засоби АСКТП**

#### **3.4.1. Технічна структура АСКТП**

Сукупність всіх технічних засобів, що використовуються в даній АСКТП з урахуванням зв'язків між приладами та пристроями, називається її технічною

структурою (за аналогією з алгоритмічною та інформаційною структурою).

На рис. 3.8 у загальній формі зображено таку структуру. Безпосередньо на об'єкті встановлені давачі, які сприймають кількісні значення параметрів процесу; регулюючі органи, здійснюючі керуючі діяння шляхом зміни стану клапанів або заслонок, зміни швидкості обертання двигунів та ін.; сигналізуючі двопозиційні органи, що дають інформацію про включення або виключення того чи іншого технологічного обладнання. Безпосередньо поблизу технологічних агрегатів встановлюються місцеві щити керування, на яких монтуються регулятори 1, вторинні показуючі 2 та самописні 3 прилади, а також вузли локальної автоматики 4. Оператори процесу знаходяться в операторській, де розташований ПТО 14, а також кросова шафа 16 і друку-вальний пристрій 15. На ПТО встановлюються показуючі 5, самописні 6, цифрові 7 прилади, дисплей 8, сигнальні табло 9, 10, дистанційні задатчики регуляторів 11, клавіатура для викликання показань приладів 12, засоби цехового зв'язку 13. До складу керуючого обчислювального комплексу входять основні його пристрої 17 та 18, пульт програміста 19, АЦДП 20, пристрої вводу-виводу 21, 22. Засоби АСК, наведені на рисунку, можуть доповнюватися також засобами телемеханіки, якщо об'єкт розташується протягом 2...3 км.

Звернемо увагу на курсовий шкаф 16 та зв'язок між ним та пристроєм 17ЕОМ. Саме ця частина технічної структури АСКТП містить у собі пристрій зв'язку з об'єктом (ПЗО), спрощена схема якого показана на рис. 3.9.

Інформаційний зв'язок між ЕОМ та ТОК здійснюється за допомогою давачів (Д) і виконавчих органів (ВО). Виміряна інформація про поточні значення технологічних параметрів  $u_1, \dots, u_k$  передається у вигляді аналогових сигналів електричної напруги, пневматичного тиску, кута повороту вала та ін. Для перетворення сигналів різної фізичної природи в єдину форму застосовуються уніфіковані аналогові перетворювачі (УАП), а для перетворення безперервних сигналів в дискретну форму — аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для зменшення витрат апаратури використовується комутатор аналогових сигналів (КАС), який по черзі підключає вихід кожного давача до АЦП. Цифровий код з виходу

АЦП, одержаний внаслідок перетворення, через інтерфейс вводу-виводу (ПК — шина керування, ШД — шина

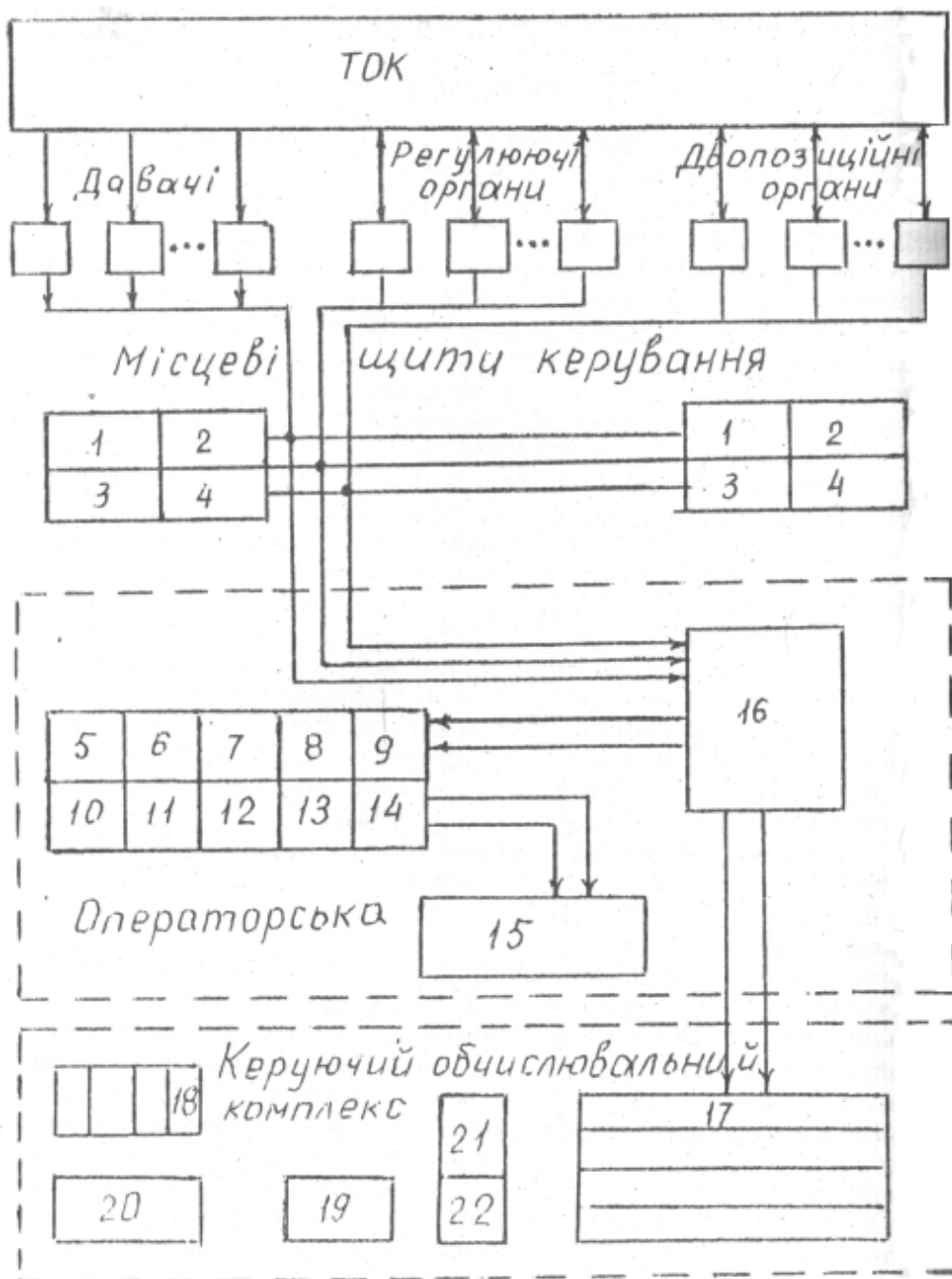


Рис. 3.8. Технічна структура АСКТП

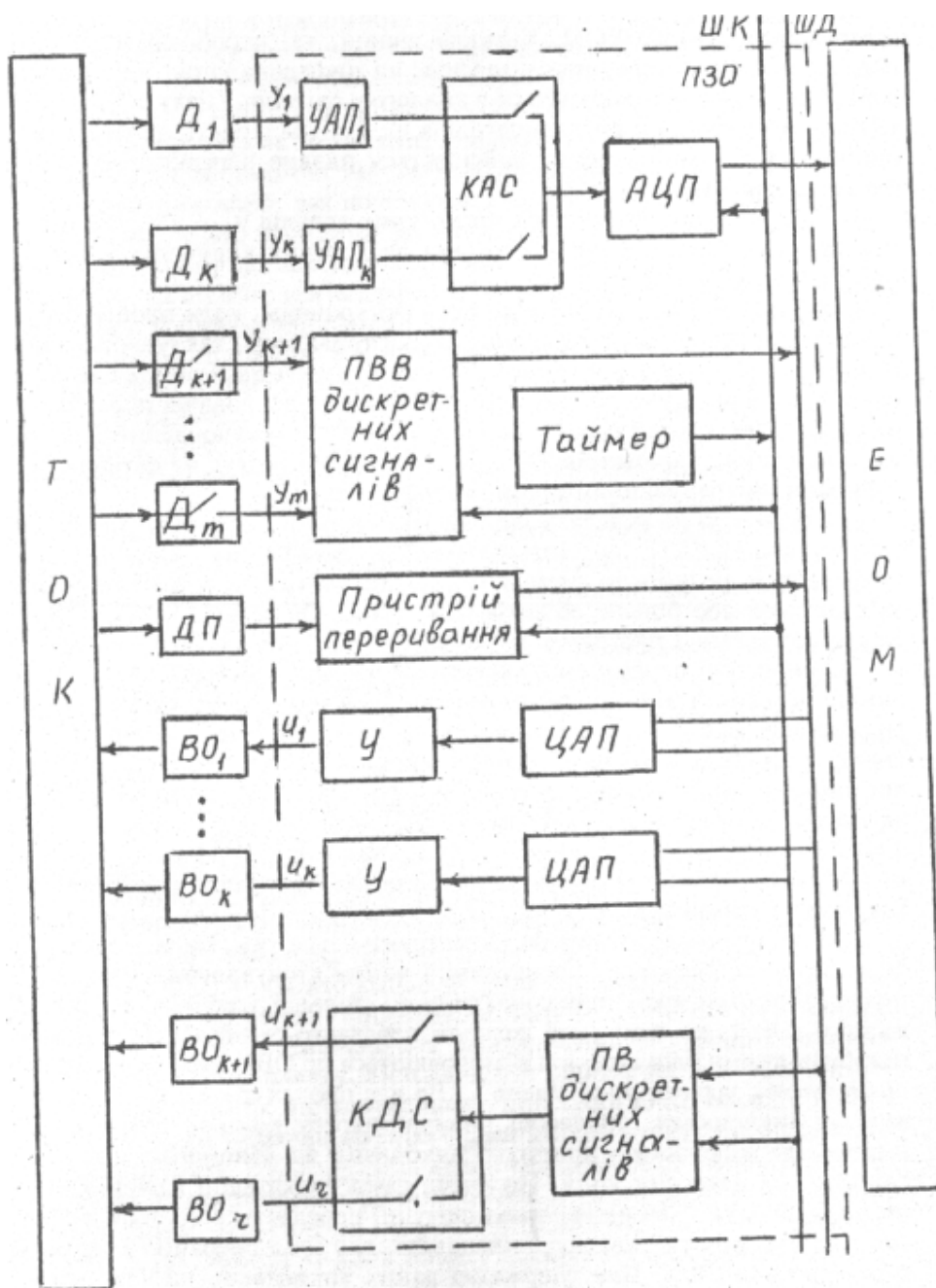


Рис. 3.9. Спрощена схема ПЗО 755

даних) вводиться до ЕОМ. Керуючі діяння, які виробляються ЕОМ, подаються також через цей інтерфейс на цифроаналогові перетворювачі (ЦАП), де перетворюються в аналогові сигнали. Після підсилення ( $U$ ) керуючі діяння у вигляді сигналів  $U_j, \dots, u_k$  надходять на виконавчі органи, за допомогою яких здійснюється плавне регулювання параметрів стану ТОК.

Ввід до ЕОМ сигналів від дискретних давачів  $U_{k+i}, \dots, u_{\text{ш}}$  забезпечує пристрій вводу (ПВВ), а видачу дискретних керуючих діянь — пристрій виводу (ПВ).

Зв'язок ЕОМ та ТОК може бути синхронним, коли процес керування розподіляється на цикли однакової тривалості, тактуючими сигналами таймеру та асинхронним, за яким замість тактуючих сигналів надходять через пристрій переривання сигнали від давачів переривання (ДП). Цей другий режим зв'язку може бути встановлений для деяких важливих параметрів ТОК, причому ЕОМ реагує на сигнали переривання з урахуванням рівня їх пріоритету.

Перейдемо до розгляду ще одного важливого елемента технічної структури АСКТП — інтерфейса. В загальному випадку під інтерфейсом розуміють алгоритми та апаратуру, що забезпечують зв'язок двох або більше об'єктів між собою. Об'єктами можуть бути як пристрої, так і програми. Інтерфейси вводу-виводу перетворюють інформацію, що передається від периферійного пристрою до ЕОМ та назад, передають інформацію про стан пристроїв та усувають часові розбіжності між роботою процесора та периферійних пристроїв. До складу технічних засобів інтерфейса входять електричні лінії зв'язку, логічні електронні схеми, які керують проходженням сигналів по лінії зв'язку під час реалізації алгоритму обміну інформацією. Для з'єднання модулів керуючої ЕОМ використовуються машинні інтерфейси, які можуть бути розподілені на три типи: магістральні, радіальні та комбіновані.

Магістральний інтерфейс характеризується тим, що всі пристрої (центральный процесор, оперативний запам'ятовувальний пристрій, периферійні пристрої) підключаються до спільної уніфікованої шини зв'язку (ОШ), по якій різні сигнали передаються послідовно. Обмін між будь-якими блоками, які підключаються до ОШ, здійснюється за принципом "задавач-виконавець". Під час процедури передачі



даних задавач (наприклад, процесор) вибирає адресу комірки пам'яті або регістру периферійного пристрою виконавця за допомогою підшини "адреса" 18 адресних ліній. Передача самої інформації здійснюється по підшині "дані" 16 ліній, а код операції передається по двох лініях "керування даними" і вказує виконавцю, яку саме операцію з даними необхідно виконати. При одержанні даних виконавець посилає задавачу сигнал, який припиняє обмін.

Керуюча ЕОМ з радіальною структурою інтерфейса вводу-виводу характеризується присутністю тільки одного керуючого модуля, до якого радіальним чином підключені керовані модулі. Використання радіального інтерфейса робить принципово неможливим безпосередній зв'язок між керованими модулями. Реалізація радіального інтерфейса виконується за допомогою так званого зв'язку 2К, який містить 50 однонаправлених ліній, які поділяються на дві групи: вихідні, що передають сигнали від процесора до периферійних пристроїв та засобів зв'язку, та вхідні, що передають сигнали від периферії до процесора. Зв'язок 2К, на відміну від інтерфейса магістрального типу, не має адресних шин. Передача інформації від керуючого модуля до керованого виконується по 16 шинах, а команди передаються по 9.

Інтерфейси комбінованого типу характеризуються властивостями як магістрального, так і радіального інтерфейсів. Частина інформаційних ліній інтерфейса забезпечує радіальне (паралельне) підключення модулів до керуючого модуля, а частина ліній послідовно з'єднує модулі за магістральним принципом (наприклад, лінії даних). До інтерфейсів комбінованого типу належить інтерфейс КАМАК, призначений для зв'язку керуючої ЕОМ з електровимірювальними приладами, системами збирання даних, системами керування периферійними приладами.

В більшості АСКТП, які функціонують на об'єктах хімічної технології як керуючі застосовані міні-ЕОМ, виконані на основі агрегатних засобів обчислювальної техніки — АСВТ-М. Це в першу чергу комплекси СМ-2, СМ-2М, СМ-1210 та розроблені на їх основі спеціалізовані пристрої: ССО-1, ССО-2 — субкомплекси зв'язку з ТОК (ПЗО); ТСО-4, ТСО-5 — термінали зв'язку з об'єктом;

PMOT-01, PMOT-02 — робочі місця технолога-оператора; ТВСО — термінал обчислювальний зв'язку з об'єктом. Розглянемо технічну структуру АСКТП на прикладі ЕОМ СМ-2 (рис. 3.10). Основа комплексу — спец-процесор СМ-2П. КОК може бути скомпонований на базі двох процесорів з двома каналами прямого доступу, ОЗП (256 Кбайт). Архітектура ОЗП — багатороздільна, фізично виконана у вигляді чотирьох блоків пристроїв оперативної пам'яті (УОП). Комутатори КМР-4 та КМР-8 призначені для забезпечення внутрішніх зв'язків між пристроями комплексу. Підключення периферії виконане за допомогою спеціальних узгоджувальних пристроїв вводу-виводу (СВВ) з використанням радіального інтерфейсу 2К. До складу периферійних пристроїв входять: БВАС — блок вводу аналогових сигналів; БВДС — блок вводу дискретної інформації; БВАИ — блок виводу аналогової інформації; ДМ — дисплейні модулі; УВБПЛ, УВПЛ, УПП — пристрої вводу та друку; БВДИ — блок виводу дискретної інформації.

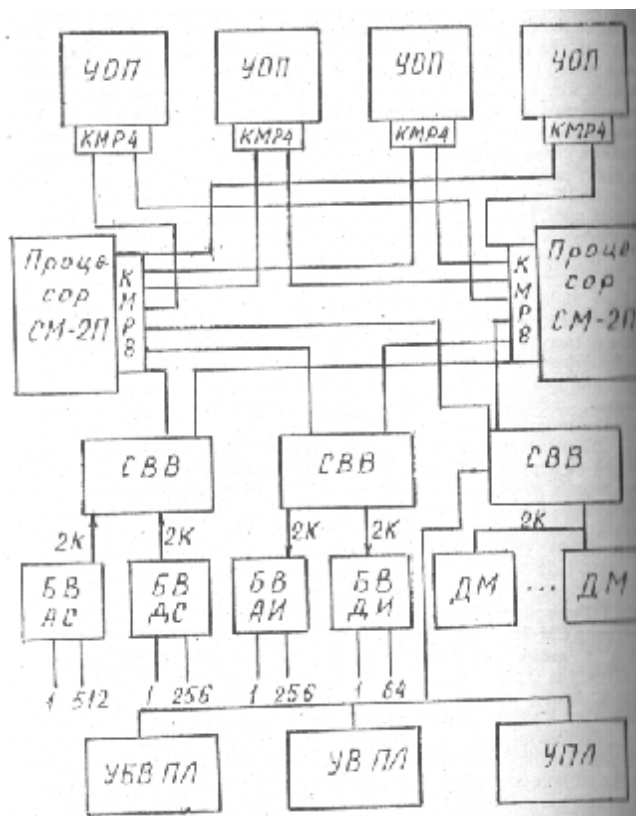


Рис. 3.10. Технічна структура АСКТП на базі СМ-2

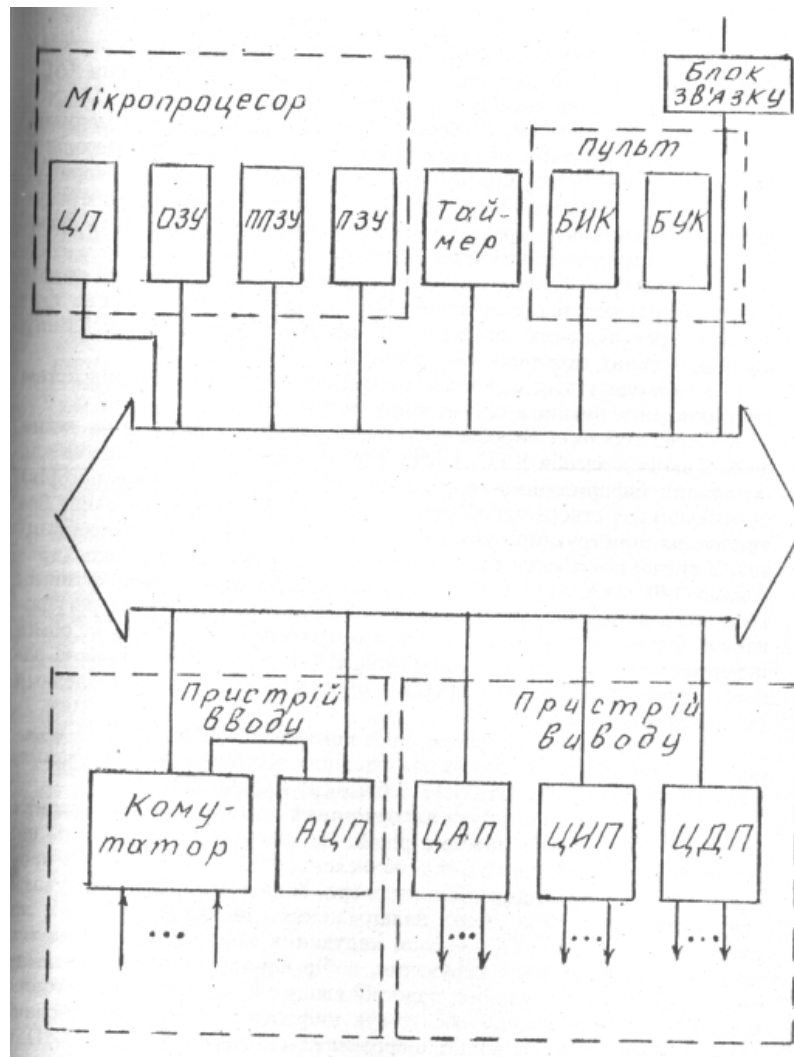


Рис. 3.11. Структурна схема системи РЕМИКОНТ

Програмне забезпечення комплексів також виконане за агрегатним принципом, агрегатна система програмного забезпечення (АС-ПО). До неї входять дискові операційні системи — ДОС АСПО, система підготовки програм, бібліотека прикладних програмних модулів.

Торкнемося також питання про використання мікропроцесорів у засобах цифрового керування. Тут можна виділити такі три напрями:

- 1) створення спеціалізованих пристроїв для одноканальних регуляторів, які володіють кращими ніж стандартні динамічними та експлуатаційними характеристиками (цифрові регулятори);
- 2) створення багатоканальних цифрових регуляторів, які дозволяють реалізувати

багатозв'язкове регулювання, регулювання за збуренням, регулювання об'єктів із запізненням, а також зміну функціональних можливостей програмними засобами;

3) використання серійних мікро-ЕОМ для створення підсистем контролю та керування технологічними процесами.

Серед серійних виробів третього напрямку зупинимося на таких двох. Технічні засоби КТС-ЛИУС-2 (комплекс технічних засобів для локальних інформаційно-керуючих систем на базі мікропроцесорів) призначені для створення об'єктно орієнтованих систем керування без виконання конструкторських робіт та технічної підготовки виробництва. У складі комплексу є набір елементів, так званих субблоків (приблизно 140 шт.). Цей набір дозволяє реалізувати основні функції: ввід-вивід аналогової та дискретної інформації, автоматичне регулювання, логічне керування, зв'язок з оперативним персоналом, обмін інформацією з пристроями. Інтерфейс ИК-1 (типу ОШ). Сумісна робота елементів координується програмованими контролерами (мікропроцесорами).

Регулюючий мікропроцесорний контролер (РЕМИКОНТ) є основним елементом так званих розподілених засобів систем керування. Структурну схему РЕМИКОНТ зображено на рис. 3.11.

РЕМИКОНТ може бути використаний в автоматичних системах контролю і керування нижчого рівня. На рисунку: ОЗУ — дані, що поновлюються в кожному циклі обчислень; ЦП — центральний процесор; БИК — блок індикації контролера, який дозволяє програмувати структуру контролера, його налагодження, індикацію вхідних та вихідних сигналів; БУК — блок керування контролером, дозволяє здійснювати оперативне керування, вибір каналу, перехід з автоматичного на ручне керування; пристрій вводу обслуговує 16 аналогових каналів; пристрій виводу обслуговує цифроаналогові перетворювачі ЦАП з виходом 0—10 вольт, цифроімпульсні перетворювачі ЦИП з виходом 0—24 вольт, вивід на реле — ЦДП.

```
DECLARE SUB WP (TP!, Q!(), Y!())
```

```
DECLARE SUB PCH (X!(), U!(), F!())
```

'Програма RRS (рішення рівнянь стану).

'В програмі виконується рішення системи звичайних диференціальних рівнянь

'методом Рунге-Кутта четвертого порядку; PCH — підпрограма розрахунку

'правих частин; WP — підпрограма розрахунку вихідних параметрів, виводу

'результатів .

'Налагодження програми.

```
CLS
```

```
DIM N%, R%, M%, 1%, L%
```

```
INPUT "Порядок системи"; N
```

```
INPUT "Кількість керувань"; R
```

```
INPUT "Кількість виходів"; M
```

'TP-поточний час; Q(N),X(N)-масиви стану; F(N)-масив функцій правих частин;

'K(4,N)-масив коефіцієнтів K1-K4; U(R)-масив керувань; Y(M)- масив виходів

TP=0

```
DIM Q(N), X(N), F(N), K(4, N), U(R), Y(M)
```

```
PRINT
```

```
PRINT "Початкові умови при t = 0: "
```

```
FOR I = 1 TO N
```

```
INPUT Q(I)
```

```
NEXT I
```

```
PRINT
```

```
PRINT "Керування: "
```

```
FOR I = 1 TO R
```

```
INPUT U (I)
```

```
NEXT I
```

```
MI:
```

```
PRINT
```

```

INPUT "Крок за часом"; T
CLS
'Метод Рунге-Кутта
IF TP - 0 THEN CALL WP(TP, Q(), YO)
'цикл на 20 точок з кроком T за часом
FOR L - 0 TO 19
FOR I - 1 TO N
X(I) - Q(I)
NEXT I
CALLPCHOCO.UO, FO)
FOR I - 1 TO N
K(1,I)-T»F(I)
X(I)-Q(I)+K(1,I)/2
NEXT I
CALLPCH(XO, UO.FO)
FOR I - 1 TO N
K(2, I) - T « F(I)
X(I) - Q(I) + K(2, I) / 2
NEXT I
CALL PCH (XO, UO.FO)
FOR I - 1 TO N
K(3, I) - T * F(I)
X(I)-Q(I)+K(3, I)/2
NEXT I
CALLPCH(XO, UO.FO)
FOR I - 1 TO N
K(4, I) - T * F(I)
Q(I) - Q(I) + (K(1, I) + 2 * K(2, I) + 2 • K(3, I) + K(4, I)) / 6
NEXT I
TP - TP + T

```

```
CALL WP(TP, QO, YO)
```

```
NEXT L
```

```
LINE INPUT "Бажаєте одержати наступні значення? (Y/N)"; A$
```

```
IF A$ - "Y" GOTO MI
```

```
END
```

```
SUB PCH (X(), UO, FO)
```

```
F(1) - -.08 * X(1) + .168 * U(1) 1 2 + .008
```

```
F(2) - (.7 * (XO) - X(2)) > - .4 * SQR((X(2) - X(3)) * X(3))) / 4
```

```
IF X(3) 2 THEN
```

```
F(3) - (.4 * SQR((X(2) - X(3)) * X(3)) - .25 * U(2) * X(3)) / 3
```

```
ELSE
```

```
F(3) - (.4 * SQR((X(2) - X(3)) * X(3)) - .5 * U(2) * SQR((X(3) - .1) / 10)) / 3
```

```
END IF
```

```
END SUB
```

```
SUB WP (TP, QO, YO)
```

```
Y(1)-Q(2)
```

```
Y(2) - .4 * SQR((Q(1) - Q(2)) * Q(2))
```

```
IF TP - 0 THEN
```

```
PRINT " час вихідні параметри "
```

```
PRINT " t YO) Y(2) "
```

```
PRINT USING "###.### "; TP; Yd); Y(2)
```

```
ELSE
```

```
PRINT USING "###.### "; TP; YO); Y(2)
```

```
END IF
```

```
END SUB
```

```
DECLARE SUB pch (x!(), f!())
```

```
DECLARE SUB inv (n!, y!(), r!(), fl)
```

'Програма RRT (розрахунок робочої точки). Склад: головна програма,

'підпрограма PCH , де містяться праві частини диф. рівнянь та

'рівняння виходу з бажаними значеннями параметрів.

CLS

DIM n%, p%, m%, j%, n%

INPUT "Відхилення"; del

INPUT "Розмірність"; n

DIM x(n), d(n), f(n), g(n), h(n), y(n, n), r(n, n)

PRINT "Початкові значення x(1)...x("; n; ")"

FOR p = 1 TO n

INPUT x(p)

NEXT p

CLS ml:

CALL pch(x<), fO)

dl=0

FOR p = 1 TO n

g(p) = f (p)

dl =dl+ABS(g(p))

NEXT p

IF dl < .001 THEN GOTO ш2

'Розрахунок похідних

FOR p = 1 TO n

x(p) = x(p) + del

CALL pch(xO, fO)

FOR j = 1 TO n

h(j) = f(j)

NEXT j

x(p) = x(p) - 2 \* del

CALL pch(x(),fO)

FOR j = 1 TO n

y(j, P) = <h(j) - f(j)) / del / 2

NEXTj



```

x(p) -x(p) +del
NEXTp
CALLinv(n, y(), r(),.fl)
IF П - 1 THEN GOTO ш3
FOR p - 1 TO n
d(p) - 0
FOR j - 1 TO li
d(p) - d(p) + r(p, j) * g(j)
NEXTj
x(p) - x(p) - d(p)
NEXT p
GOTO ml
m2:
PRINT "Рішення"
PRINT "Координати робочо; точки:"
FOR p - 1 TO n
PRINT x(p)
NEXTp
m3:
END

SUB inv (n, y(), r(), fl)
DIMe(n, n), z(n)
DIMi%,j%,k%,l%
fl-0
IF yd, D-OTHER
PRINT "Матриця не інвертується": И - I
ELSE
FOR i - 1 TO n
FOR j - 1 TO ne(i,j)-0
NEXTj

```

```

 $e(i) = 1$ 
NEXT i
FOR k = 1 TO n-1
  FOR i = k + 1 TO n
    IF  $y(i, k) = 0$  GOTO m4
     $z(i) = y(k, k) / y(i, k)$ 
    FOR l = 1 TO n
       $e(i, l) = e(k, l) - z(i) * e(i, l)$ 
    NEXT l
  FOR j = k TO n
     $y(i, j) = y(k, j) - z(i) * y(i, j)$ 
  NEXT j
m4:
NEXT i
NEXT k
IF  $y(n, n) \neq 0$  THEN
  PRINT "Нема рішення": fl = 1
ELSE
  FOR l = 1 TO n
     $r(n, l) = e(n, l) / y(n, n)$ 
    FOR J = n-1 TO 1 STEP -1
      s = 0
      FOR i = J + 1 TO n
         $s = s + y(j, i) * r(i, l)$ 
      NEXT i
       $r(j, l) = (e(j, l) - s) / y(j, j)$ 
    NEXT j
  NEXT l
NEXT l
END IF
END IF

```

END SUB

SUB pch (xO, fO)

f(1) = -.08 \* x(1) + .168 \* x(4)<sup>11</sup> \* 2 + .008

f(2) = (.7 \* (x(1) — x(2)) — .4 \* SQR((x(2) — x(3)) \* x(3))) / 4

f(3) = (.4 \* SQR((x(2) - x(3)) \* x(3)) — .25 \* x(3)) / 3

f(4) = .2 - .4 \* SQR((x(2) — x(3)) \* x(3))

END SUB

DECLARE SUB pch (v!(), ПО)

'Програма LMS (лінеаризація моделі стану). Склад: головна програма,  
'підпрограма правих частин рівнянь стану та виходу РСН.

'Налагодження програми

INPUT "Розмірність векторів стану, керування, виходу"; п, ш, р

DIM a(п, п), Ь(п, ш), с(р, п), d(р, ш), f(n + p), h(n + p), v(n + ш)

INPUT "Відхилення"; del

PRINT :PRINT "Координати робочої точки 1..."; п + m

FOR i = 1 TO n + m

INPUT v(i)

NEXT i

CLS

'Обчислення похідних

FOR l = 1 TO n + m

v(i) = v(i) + del

CALL pch(v(), f(»

FOR j = 1 TO n + p

h(j) = f(j)

NEXT j

v(i) = v(l) - 2 \* del

CALL pch(v(), fO)

FOR j = 1 TO n + p

```

IF i > n GOTO m1
IF j > n GOTO m2
a(j, 1) - (h(j) - f(j)) / del / 2
GOTO m3
m1:
IF j > n GOTO m4
b(j, i - n) - (h(j) - f(j)) / del / 2
GOTO m3
m2:
c(j - n, 1) - (h(j) - f(j)) / del / 2
GOTO m3
m4:
d(j - n, 1 - n) - (h(j) - f(j)) / del / 2
m3:
NEXTj
v(i) - v(1) + del
NEXT i
'Результати
PRINT "Матриця стану A" :PRINT
FOR i=1 TO n
FOR j = 1 TO n
PRINT TAB(5 * (j - 1)); a(i, j);
NEXTj
PRINT
NEXT i
PRINT: PRINT "Матриця керування B" :PRINT
FOR i = 1 TO n
FOR j = 1 TO m
PRINT TAB(15 * (j - 1)); b(i, j);
NEXTj

```

```

PRINT
NEXT i
PRINT :PRINT :PRINT "Матриця спостереження C" :PRINT
FOR i - 1 TO p
FOR j - 1 TO n
PRINT TAB(15 * (j — 1»); c(l, j);
NEXTj
PRINTNEXT)

PRINT :PRINT :PRINT "Матриця транзиту D" :PRINT
FOR i - 1 TO p
FOR j - 1 TO m
PRINTTABU5*(j — 1)); d(i, j);
NEXT j
PRINT
NEXT i
END
SUB pch(v(), f())
f(1) - .168 * v(4)T 2 — .08 * v(1) + .008
f(2) - .25 * (.7 * vU) — .7 * v(2) - .4 * SQR((v(2) — v(3)) * v(3)))
f(3) - .333 * (.4 * SQR((v(2) - v(3)) * v(3)) - .25 « v(5) * v(3))
f(4) - v(2)
f(5) - .4 * SQR«v<2) - v(3)) * v(3))
END SUB

```

'Програма RSK (розрахунок замкненого контура). PRINT "Обчислення матриць замкненого контура керування" INPUT "Розмірність N"; n: kd - 0  
DIM ae(n, n), be(n, 2), ce(n), de(2), a(n + 1, n + 1), h(n + 1, 2), c(n + 1), d(2) DIM e(n + 1, n + 1), i(n + 1, n + 1), r(n + 1), m(n + 1, n + 1) PRINT "Вихідні дані": PRINT  
PRINT "Ввід матриці стану A" FOR i - 1 TO n FOR j - 1 TO n  
PRINT " A("; i, ", "; j, ")"; : INPUT ae(i, j) NEXT j NEXT i

```

PRINT : PRINT "Ввід матриці керування B" FOR i - 1 TO n FOR
j - 1 TO 2
PRINT " B("; i; ", "; j; ")"; : INPUT bed, j) NEXT j NEXT i
PRINT : PRINT "Ввід вектора спостереження C" FOR i - 1 TO n
PRINT " C("; i; ")"; : INPUT ce(i) NEXT i
PRINT : PRINT "Ввід вектора збурень D " FOR i - 1 TO 2
PRINT " D("; i; ")"; : INPUT de(i) NEXT i CLS
IF de(1) - 0 AND de(2) - 0 THEN sd - 1
PRINT "Параметри закону керування": INPUT "KP"; kp: INPUT "KI"; ki 'D-
частина можлива тільки, якщо матриця збурень - 0 -.. IF sd THEN INPUT "KD";
kd co-1 / (1 +kp*de(D)
FOR i - 1 TO n
FOR j - 1 TO n
a(i, j) - ae(l, j) — kp * co * bed, 1) * ce(j)
NEXT j
ad, n + 1) - -ki • co * bed, 1): a(n + 1, i) - co * ce(i)
bd, 1) - kp * co * bed, 1): b(i, 2) - bed, 2) — kp * co * de(2)
c(i) - co * ce(i)
NEXT i
a(n + 1, n + 1) - -ki » co * ded): b(n + 1, 1) - -co: b(n + 1, 2) - co * de(2)
c(n + 1) - -ki * co * ded): d(1) - kp * co * ded): d(2) - co * de(2)
IF kd - 0 GOTO ml
FOR i - 1 TO n
ed, 1) - 1
FOR j - 1 TO n
aid, j) - ed, j) + kd • bed, 1) • ce(j)
NEXT j
m(i, n+ 1) -0: m(n+ 1, i) -0
NEXT i
m(n + 1, - n + 1) - 1: e(n + 1, n + 1) - 1

```

Інвертування матриці

FOR  $k = 1$  TO  $n$

FOR  $i = k + 1$  TO  $n + 1$

IF  $m(k, j) = 0$  GOTO  $m2$

$rd = m(k, k) / m(k, k)$

FOR  $l = 1$  TO  $n + 1$

$ed, l = e(k, i) - rd * ed, l$

NEXT  $l$

FOR  $j = k$  TO  $n + 1$

$md, j = m(k, j) - rd * md, j$

NEXT  $j$

$m2:$

NEXT  $i$

NEXT  $k$

FOR  $l = 1$  TO  $n + 1$

$l(n + 1, 1) = e(n + 1, 1) / m(n + 1, n + 1)$

FOR  $j = n$  TO  $1$  STEP  $-1$

$S = 0$

FOR  $i = j + 1$  TO  $n + 1$

$s = s + m(j, i) * id, i$

NEXT  $i$

$i(j, i) = (e(j, i) - s) / m(j, j)$

NEXT  $j$

NEXT  $l$

FOR  $i = 1$  TO  $n + 1$

FOR  $j = 1$  TO  $n + 1$

$md, j = 0$

FOR  $l = 1$  TO  $n + 1$

$md, j = md, j + id, l * ad, l$

NEXT  $l$

NEXT j

NEXT l19\*

FOR i = 1 TO n + 1

FOR j = 1 TO n + 1

$a(i,j) - m(i,j)$

NEXT j

NEXT i

FOR i = 1 TO n + 1

FOR j = 1 TO 2

$m(i,j) = 0$

FOR l = 1 TO n

$m(i,j) = m(i,j) + III(l) * b(l,j)$

NEXT l

NEXT j

NEXT i

FOR l = 1 TO n + 1

FOR j = 1 TO 2

$b(i,j) = m(l,j)$

NEXT j

NEXT l

ml:

CLS : PRINT "Матриця стану A\* ": PRINT

FOR i = 1 TO n + 1

FOR j = 1 TO n + 1

PRINT TAB(5 \* (J - 1) \* ad, J);

NEXT j

PRINT

NEXT i

PRINT : PRINT "Матриця керування B\* ": PRINT

FOR i = 1 TO n + 1



```

FOR j = 1 TO 2
PRINT TAB(15 * (J — 1)); b(l, j);
NEXT J
PRINT
NEXT l
PRINT : PRINT " Вектор спостереження C* ": PRINT
FOR i = 1 TO n+1
PRINT TAB(5 * (i — 1)); c(i);
NEXT i
PRINT : PRINT
IF sd THEN PRINT " Матриця транзиту - 0 "
END
PRINT " Вектор транзиту DT* ": PRINT
FOR i = 1 TO 2
PRINT TAB(5 * (i — 1)); d(i);
NEXT i
END

```

'Програма SWW (модель стану — модель вхід-вихід)

```

INPUT "Розмірність N"; N: PRINT
DIM S(2), H(N + 1, 2), R(N, N), D(N, N), F(N), G(2), P(2), UA(2), VA(2)
DIM A(N, N), B(N), C(N)
PRINT "Матриця стану AC; N; ", "; N; "): PRINT
FOR I = 1 TO N
FOR J = 1 TO N
PRINT "AC; I; J; ");
INPUT A(I, J)
NEXT J
NEXT I
PRINT : PRINT "Вектор керування BC; N; "): PRINT

```

```

FOR I - 1 TO N
PRINT "B("; I; ")";
INPUT B (I)
NEXT I
PRINT : PRINT "Вектор спостереження CT("; N; ")": PRINT
FOR I - 1 TO N
PRINT "CTC; I; ")";
INPUT C(I)
NEXT I
PRINT : PRINT "Коефіцієнт транзиту D": PRINT : INPUT DD
'Алгоритм Фаддєєва
H(N+1,2)-1
FOR I - 1 TO N
R(I,1)-1
NEXT I
FOR I - 1 TO N
FOR J - 1 TO N
F(J)-0
FOR K - 1 TO N
F(J)-F(J)+C(K)*R(K,J)
NEXT K
NEXT J
H(N+1 — I, 1)-0-
FOR J - 1 TO N
H(N+1 — I, 1)-H(N+1 — I, 1)+F(J)*B(J)
NEXT J
FOR J - 1 TO N
FOR K - 1 TO N
D(J,K)-0
FOR L-1TON

```

```

D(J,K)-AO,L)*R(L,K)+DO,K)
NEXTL
NEXT K
NEXT J
H(N+1—I, 2)-0
FOR J - 1 TO N
H(N+1—I,2)-H(N+1—I,2)—DO,J)
NEXT J
H(N+1—I,2)-H(N+1—I,2)/I
FOR J - 1 TO N
FOR K - 1 TO N
R(J,K)-DO,K)
NEXT K
R(J,J)-D(J,J)+H(N+1—I,2)
NEXT J
NEXT I
FOR I - 1 TO N + 1
H(I, 1)-H(I, 1)+DD«H(I, 2)
NEXT I
CLS
FOR I - 1 TO 900
W1-W1+W11 5
NEXT I
PRINT ; "Чисельник: / Знаменник:"
FOR I - 1 TO N + 1
PRINT ; H(I, 1); " PI"; I — 1;
PRINT , "/";
PRINT , HO, 2); " PI"; I — 1: PRINT
NEXT I
END

```

Програма RHP (розрахунок характеристичного поліному)

INPUT "Модель вхід-вихід:P; модель стану:E"; 1\$

INPUT "Розмірність N"; N: M = N + 1: DIM K(M, 3): DEF FNQ (X) = X \* X: CLS

IF 1\$ = "P" GOTO ml

DIM A(N, N), S(N, N), T(N, N)

FOR I = 1 TO N

FOR J = 1 TO N

PRINT "A("; I; J; ")"; : INPUT A(I, J): T(I, J) = A(I, J)

NEXT J

NEXT I

KU.D=1

FOR L=1 TO N

FOR I = 1 TO N

$K(L+1, 1) = K(L+1, 1) - T(I, I)$

NEXT I

$K(L+1, 1) = K(L+1, 1) / L$

FOR I = 1 TO N

FOR J = 1 TO N

$S(I, J) = T(I, J)$

NEXT J

$S(I) = T(I, I) + K(L+1, 1)$

NEXT I

FOR I = 1 TO N

FOR J = 1 TO N

$T(I, J) = 0$

FOR K = 1 TO N

$T(I, J) = T(I, J) + A(I, K) * S(K, J)$

NEXT K

NEXT J

NEXT I

```

NEXTL
CLS : PRINT "Характеристичний поліном"
FOR I=1 TO M
PRINT "PI"; M — I, K(I, 1)
NEXT I
GOTO m2
m1:
PRINT "Коефіцієнти поліному": PRINT : PRINT
FOR I=1 TO M
PRINT "XI"; M — I; : INPUT K(I, 1)
NEXT I
m2: PRINT N; "Корені поліному"
FOR I = 1 TO M
K(I, 2)-K(I, 1):K(I, 3)-K(I, 1)
NEXT I
PRINT : IF M > 3 GOTO ш3
ZA - 0: IP - 0: EPS - .000001
m5: INPUT "Зона пошуку XMIN.XMAX"; XN, XX: CLS
m9: XS - (XX - XN) / 30: X - XN: GOSUB 9745
m7: F1 - F: X - X + XS: IF X <= XX GOTO ш4
PRINT : PRINT "Нема дійсних коренів між"; XN; "..."; XX: PRINT
PRINT "Інша зона пошуку? Введіть 1 / Комплексні корені ? Введіть 2"
INPUT IP: CLS : ON IP GOTO m5, ш6
ш4: GOSUB 9745: IF SGN(F) - SGN(F1) GOTO ш7
шЮ: X - X - F / FS: ZA - ZA + 1: IF ZA <= 50 GOTO ш8
PRINT "Значення EPS дуже велике. Введіть нове значення"; EP,S
INPUT EPS: ZA - 0: GOTO m9
m8: GOSUB 9745: IF ABS(F) > EPS GOTO mЮ
PRINT "Корені поліному": PRINT : PRINT X
M - M — 1: REM перетворений поліном

```

ш15:

FOR I - 1 TO M

K(I, 1) - K(I, 2)

NEXT I

IF M > 3 AND IP о 2 GOTO m9

IF M > 3 AND IP - 2 GOTO m6

m3: R - FNQ(K(2, 2) / (2 \* K(1, 2))) — K(3, 2) / K(1, 2))

REM рішення квадратного рівняння

IF R < 0 GOTO ml 1

PRINT -K(2, 2) / (2 \* K(1, 2)) + SQR(R): PRINT -K(2, 2) / (2 \* K(1, 2)) — SQR(R)

END

ml: PRINT -K(2, 2) / (2 \* KO, 2)); "+J"; SQR(-R)

PRINT -K(2, 2) / (2 \* K(1, 2)); "-J"; SQR(-R)

END

9745 REM схема Горнера K(1,2)-K(1, 1):K(1,3)-K<1,

1) FOR I - 1 TO M - 1 K(I + 1,2)- K(I, 2) \* X + K(I + 1,

1) K(I + 1,3)- K(I, 3) \* X + K(I + 1, 2) NEXT I

F-K(M,2):FS-K(M—1, 3) RETURN

ш6: REM комплексні корені

P - X: Q - X: REM початкове значення

ml3: GOSUB 9805

IF FNQ(FR) + FNQ(FI) < 1E-08 GOTO ml2

NR - FNQ(SR) + FNQ(SI): P - P — (FR \* SR + FI • SI) / NR

Q - Q + (FR \* SI — FI \* SR) / NR: GOTO ml3

9805 REM схема Коллатца

T - FNQ(P) + FNQ(Q): S - -2 ♦ P: KO, 2) - KO, 1)

K(2, 2)-K(2, 1) — S\*K(1, 2)

FOR I - 3 TO M — 1

Ktt, 2) - K(I, 1) — S • K(I — 1, 2) — T • K(I — 2, 2)

```

NEXT I
K(M, 2) - K(M, 1) — T * K(M — 2, 2): FR - K(M — 1, 2) * P + K(M, 2)
FI - K(M — 1, 2) * Q: KO, 3) - K(1, 1): K(2, 3) - K(2, 2) — S * KO, 3)
IF M <- 5 GOTO ml4
FOR I - 3 TO M — 3
K(I, 3) - K(I, 2) — S * K(I — 1, 3) — T * Ktt — 2, 3)
NEXT I
BO - S * K(M — 2, 3) — 2 » T * K(M — 3, 3) + K(M — 1, 2)
ml4: K(M'i- 2, 3) - K(M — 2, 2) — T • K(M — 4, 3): Bl - 2 * K(M — 2, 3) — S *
K(M —
— 3,3)
SR - Bl * P + BO: SI - Bl * Q
RETURN

ml 2: PRINT : PRINT "Корені поліному": PRINT PRINT P;
"+J"; ABS(Q): PRINT P; "-J"; ABS(Q) M - M — 2: GOTO
III5

```

'Програма DRS (дискретні рівняння стану)

```

20 INPUT "N,M,P"; N, M, P
30 ST - 0: SF - 0: RW - 25
40 DIM A(N, N), B(N, M), C(P, N), R(N, M), D(P, M), P(N, N), Y(N, N), S (N, N)
50 DIM M(N, N), Q(N), U(M), V(N), W(N), X(P)
60 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO N: PRINT "AC; I; J; " ";
70 INPUT Att, J)
NEXT J: NEXT I: PRINT
80 FOR I - 1 TO N: FOR i - 1 TO M: PRINT "B("; I; J; " ";
90 INPUT B (I, J)
NEXT J: NEXT I: PRINT
100 FOR I - 1 TO P: FOR J - 1 TO N: PRINT "C("; I; J; " ";
110 INPUT CO, J)

```

```

NEXT J: NEXT I: PRINT
120 FOR I - 1 TO P: FOR J - 1 TO M: PRINT "DC; I; J; ";
130 INPUT D (I, J)
NEXT J: NEXT I
140 INPUT "ІНТЕРВАЛ ЧАСУ Т"; T
'РОЗРАХУНОК ФУНДАМЕНТАЛЬНОЇ МАТРИЦІ
160 K-1
170 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO N: P(I, J) - 0: M(I, J) - 0: S(I, J) - 0: NEXT J
180 P(I, I) - 1: M(I, I) - I: SO, I) - T: NEXT I:
190 NO-0
200 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO N: YO, J) - 0
210 FOR L-1 TO N: YO, J) - YO, J) + MO, L) * A(L, J) * T / K: NEXT L
220 PO, J) - PO, J) + YO, J): SO, J) - SO, J) + YO, J) * T / (K + 1)
230 NO - NO + ABS(YO, J)): NEXT J: NEXT I
240 IF NO <- .01 GOTO 280,
250 K - K + 1: FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO N
260 MO, J) - YO, J): NEXT J: NEXT I: GOTO 190
'РОЗРАХУНОК МАТРИЦІ КЕРУВАНЬ
280 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO M: RO, J) - 0
290 FOR L - 1 TO N: RO, J) - RO, J) + SO, L) * B(L, J): NEXT L
300 NEXT J: NEXT I: CLS : IF SF THEN GOSUB 1050
310 IF ST GOTO 640
320 PRINT "ФУНДАМЕНТАЛЬНА МАТРИЦЯ P(T-"; T; ")": PRINT
330 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO N: PRINT TAB(1 * (J — D); PO, J);
340 NEXT J: PRINT : NEXT I: PRINT
350 PRINT "МАТРИЦЯ КЕРУВАНЬ R(T-"; T; ")": PRINT
360 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO M: PRINT TAB(11 * (J — D); RO, J);
370 NEXT J: PRINT : NEXT I: PRINT
380 PRINT "НОВЕ ЗНАЧЕННЯ Т?:      Г
390 PRINT "ХАРАКТЕРИСТИКА ЗА ЧАСОМ?:  2"

```



```

400 PRINT "КІНЕЦЬ?: 3"
410 INPUT AP: CLS
420 ON AP GOTO 140, 450, 430
430 END

' ВВІД ДАНИХ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗА ЧАСОМ
450 MAX - 0: BP - 0: IF P - 1 THEN V - I: GOTO 470
460 PRINT "ІНДЕКС ВИХІДНОЇ ВЕЛИЧИНИ Y(I),I-?": INPUT V
470 PRINT "ПОЧАТКОВИЙ СТАН 00-0:ВВОД 0.ІНАКШЕ 1": INPUT AA
480 IF AA - 0 THEN FOR I - 1 TO N: VO) - 0: NEXT I: GOTO 530
490 PRINT "ПОЧАТКОВИЙ СТАН"; : FOR I - 1 TO N: PRINT "Q0("; I; ")";
500 INPUT VO): NEXT I: PRINT
510 PRINT "ВХІДНІ ВЕЛИЧИНИ -0:ВВІД 0ДНАКШЕ Г
520 INPUT BB: IF BB - 0 THEN R - 1: U0 - 0: U(R) - 0: CLS : GOTO 640
530 IF M - 1 THEN R - 1: GOTO 550
540 PRINT "ІНДЕКС ВХІДНОЇ ВЕЛИЧИНИ U(I)? I-?": INPUT R
550 PRINT "ХАРАКТЕРИСТИКА ВХІДНОЇ ВЕЛИЧИНИ U("; R; ")": PRINT
560 PRINT "СТРИБОК:ВВІД Г
570 PRINT "СИНУС: 2"
580 PRINT "ВИПАДКОВІСТЬ: 3"
590 INPUT BP: CLS
600 INPUT "АМПЛІТУДА U0"; U0
610 IF BP o 2 GOTO 640
620 INPUT "ОМЕГА"; OM: CLS : IF T * OM <- PI / 4 GOTO 640
630 PRINT "Т-"; T; "ДУЖЕ БАГАТО": ST - 1: GOTO 140
640 IF SF THEN GOSUB 1040

' РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗА ЧАСОМ
650 FOR I - 1 TO N: Q(I) - V(I): NEXT I
660 H - 0
670 FOR K - 0 TO RW: IF BP - 1 THEN U(R) - U0: GOTO 700
680 IF BP - 2 THEN U(R) - U0 * SIN(H * OM * T): GOTO 700

```

```

690 IF BP - 3 THEN U(R) - 2 * U0 * (RND(I) - .5)
700 X(V) - 0: FOR L - 1 TO N: X(V) - X(V) + C(V, L) * Q(L): NEXT L
710 X(V) - X(V) + D(V, R) * U(R)
720 IF ABS(X(V)) > MAX THEN MAX - ABSOC(V))
730 IF SF - 0 THEN PRINT H * T, X(V): GOTO 760
740 XA - 94 - F * X(V): IF XA > 182 OR XA < 22 GOTO 930
750 PSET (4 * K + 25, XA)
760 FOR I - 1 TO N: W(I) - 0: FOR J - 1 TO N
770 W(I) - W(I) + P(I, J) * Q(J): NEXT J
780 W(I) - W(I) + R(I, R) * U(R): NEXT I
790 FOR I - 1 TO N: Q (I) - W(I): NEXT I
800 H - H + 1: NEXT K: IF SF - 0 THEN F - 70 / MAX
810 LOCATE 25, 1: INPUT "ДАЛЬШІ ЗНАЧЕННЯ J/N?"; E$: N$ - "N"
820 IF E$ - "N" GOTO 850
830 CLS : IF SF THEN GOSUB 1040
840 GOTO 670
850 CLS : IF BP - 2 THEN INPUT "НОВЕ ЗНАЧЕННЯ ОМЕГА Y/N ?"; N$
860 IF N$ - "N" GOTO 880
870 GOTO 620
880 LOCATE 1, 50: PRINT "ВВІД": PRINT
890 IF SF THEN LOCATE 3, 50: PRINT "ТАБЛИЦЯ: Z "
900 IF SF - 0 THEN LOCATE 3, 50: PRINT "ГРАФІК:D "
910 LOCATE 4, 50: PRINT "ІНШІ ВХІД/ВИХ.ВЕЛИЧИНИ: E"
920 LOCATE 5, 50: PRINT "ІНШИЙ ІНТЕРВАЛ ЧАСУ: T "
930 IF SF THEN
LOCATE 6, 50: PRINT "ІНША ШКАЛА: F"
END IF
940 LOCATE 7, 50: PRINT "НОВИЙ ВВІД: N"
950 LOCATE 8, 50: PRINT "КІНЕЦЬ: S"
960 LOCATE 9, 50: INPUT B$: CLS

```

```

970 IF B$ - "D" THEN SF - 1: RW - 72: GOTO 640
980 IF B$ - "Z" THEN SF - 0: RW - 25: GOTO 640
990 IF B$ - "E" THEN SF - 0: RW - 25: GOTO 450
1000 IF B$ - "T" THEN SF - 1: GOTO 140
1010 IF B$ - "F" THEN PRINT "ШКАЛА F-"; F: PRINT "НОВ.ЗНАЧ.":
1015 INPUT F: CLS : GOTO 640
1020 IF B$ - "N" THEN RUN
1030 END
* КООРДИНАТИ СИСТЕМИ
1040 SCREEN 2
1050LINE (25, 102)-(315, 102)  .
1051LINE (25, 22)-(25, 182)
1060 FOR X - 65 TO 305 STEP 40: FOR Y - 103 TO 105: PSET (X, Y):
1065 NEXT Y: NEXT X
1070 FOR Y - 22 TO 182 STEP 20: FOR X - 23 TO 26: PSET (X, Y):
1075 NEXT X: NEXT Y
1080 FOR I - 1 TO 7: LOCATE 12, 5 * I + 1: PRINT 10 * I: NEXT I
1090LOCATE 2, 1: PRINT 80 / F
1091LOCATE 24, 1: PRINT -80 / F
1100 LOCATE 14, 35: PRINT "KT-*": LOCATE 2, 32: PRINT "T-"; 1105 T:
LOCATE 12, 2: PRINT "0" 1110 RETURN

```

```

10 REM ПРОГРАМА DWW ДИСКРЕТНІ "ВХІД-ВИХІД" МОДЕЛІ
20 INPUT "ПОРЯДОК N"; N
30 IF N <- 2 THEN N - 3: RESTORE 90: GOTO 50
40N-6
50 CLS : DIM F(N, 2), K(N, N), M(N, 2), T(N), Q(N — 1)
60 FOR I - 1 TO N: FOR J - 1 TO N: READ KO, J): NEXT J: NEXT I
70 DATA 1,2,4,8,16,32,5,6,4,-8,-48,-160,10,4,-8,-16,32,320
80 DATA 10,-4,-8,16,32,-320,5,-6,4,8,-48,160,1,-2,4,-8,16,-32

```

```

90 DATA 1,2,4,2,0,-8,1,-2,4
100 ST - 0: SF - 0: RW - 25:
105 PRINT " КОЕФІЦІЄНТИ ЧИСЕЛЬНИКА": PRINT : PRINT
110 FOR I - 0 TO N — 1: PRINT "PI"; I; : INPUT F(I + 1, 1): NEXT I
120 PRINT : PRINT : PRINT " КОЕФІЦІЄНТИ ЗНАМЕННИКА": PRINT : PRINT
130 FOR I - 0 TO N — 1: PRINT "PI"; I; : INPUT F(I + 1, 2): NEXT I
140 PRINT : PRINT : INPUT "ІНТЕРВАЛ КВАНТУВАННЯ"; T
150 FOR I - 0 TO N — 1: TO + 1) - T ~ I: NEXT I
160 FOR J - 1 TO 2: FOR I - 1 TO N: MO, J) - 0
170 FOR L - 1 TO N: MO, J) - MO, J) + KO, L) * F(L, J) / T(L)
180 NEXT L: NEXT I: NEXT J: CLS
190 IF ST GOTO 290
200 PRINT "ХАРАКТЕРИСТИКА ВХІДНОЇ ВЕЛИЧИНИ ЗА ЧАСОМ": PRINT
210 PRINT "СТРИБОК : 1": PRINT
220 PRINT "СІНУС : 2": PRINT
230 PRINT "ВИПАДКОВІСТЬ: 3": PRINT
240 INPUT " ВВІД "; BP: PRINT
250 INPUT " АМПЛІТУДА ВХОДУ "; U0: CLS
260 IF BP <> 2 GOTO 290
270 INPUT " ОМЕГА "; OM: CLS
280 IF OM * T > PI / 4 THEN PRINT "T-"; T; "ДУЖЕ БАГАТО": ST - 1:
285 GOTO 140
290 IF SF THEN GOSUB 740
300 FOR I - 1 TO N - 1: QO) - 0: NEXT I
310 H - 0: XM - 0
320 FOR K - 0 TO RW
330 IF BP - 1 THEN U - U0: GOTO 360
340 IF BP - 2 THEN U - U0 * SIN(H * OM ♦ T): GOTO 360
350 U - 2 * U0 * (RND(I) — .5)
360 X - (Q(N — 1) + M(I, 1) ♦ U) / MO, 2)

```

370 IF N - 6 GOTO 410

380  $Q(2) - Q(1) - M(2, 2) * X + M(2, 1) * U$

390  $Q(1) - -M(3, 2) * X + M(3, 1) * U$

400 GOTO 440

410 FOR I = 5 TO 2 STEP -1

```

420 Q(I) - Q(I - 1) - M(7 — I, 2) • X + M(7 - I, 1) * U: NEXT I
430 Q(I) - -M(6, 2) * X + M(6, 1) * U
440 IF ABS(X) > XM THEN XM - ABS(X)
450 IF SF - 0 THEN PRINT TAB (10); H * T; TAB (20); X: GOTO 480
460 XA - FX * X + 132: IF XA > 240 OR XA < 10 GOTO 610
470 PSET (4 * K + 25, XA)
480 H - H + 1: NEXT K
490 IF SF - 0 THEN FX - 75 / XM
500 PRINT : INPUT " ДАЛЬШІ ЗНАЧЕННЯ (J/N)?"; E$: N$ - "N": CLS
510 IF E$ - "N" GOTO 540
520 IF SN THEN GOSUB 740
530 GOTO 320
540 IF BP - 2 THEN INPUT " НОВЕ ОМЕГА O(N)?"; N$: CLS
550 IF N$ - "N" GOTO 570
560 GOTO 270
570 IF SF THEN PRINT "ТАБЛИЦЯ? : Z"
580 IF SF - 0 THEN PRINT "ГРАФІК? : D"
590 PRINT "ІНШИЙ ІНТЕРВАЛ КВАНТУВАННЯ? : T"
600 PRINT "ІНШІ ВХІДНІ ВЕЛИЧИНИ? : E"
610 IF SF THEN PRINT "ІНША ШКАЛА? : F"
620 PRINT "НОВИЙ ВВІД? : N"
630 PRINT "КІНЕЦЬ? : S": PRINT
640 INPUT B$: CLS
650 IF B$ - "D" THEN SF - 1: RW - 72: GOTO 290
660 IF B$ - "Z" THEN SF - 0: RW - 25: GOTO 300
670 IF B$ - "E" THEN SF - 0: RW - 25: GOTO 210
680 IF B$ - "T" THEN ST - 1: GOTO 140
690 IF B$ - "F" THEN PRINT "ШКАЛА F-"; FX: GOTO 720
700 IF B$ - "N" THEN RUN
710 END

```

## Список литературы

1. Ажогин В. В. Автоматизированное проектирование математического обеспечения АСУ ТП [Текст] : учеб. для вузов / В. В. Ажогин, М. З. Згуровский. – К. : Виш. шк., 1986. – 335 с.
2. Ажогин В. В. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ [Текст] : учеб. пособ. / В. В. Ажогин, М. З. Згуровский. – К. : Виш. шк., 1983. – 278 с.
3. Бессонов А. А. Методы и средства идентификации динамики объектов [Текст] : моногр. / А. А. Бессонов, Ю. В. Загайвили, А. С. Маркелов. – Л. : Энергоиздат, 1989. – 279 с.
4. Бондарь А. Г. Реализация подсистемы управления блоком синтеза в АСУ ТП производства аммиака [Текст] / А. Г. Бондарь, Р. Б. Медведев, А. В. Федоров // Управляющие системы и машины. – 1980. – № 4 – С. 37–40.
5. Брановицкая С. В. Вычислительная математика в химии и химической технологии [Текст] : учеб. для вузов / С. В. Брановицкая, Р. Б. Медведев, Ю. А. Фиалков. – К. : Виш. шк., 1986. – 215 с.
6. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием [Текст] : моногр. ; [пер. с польск.]. / Х. Гурецкий. – М. : Машиностроение, 1974. – 327 с.
7. Дудников Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности: [Текст] : учеб. для вузов / Е. Г. Дудников. – М. : Химия, 1987. – 368 с.
8. Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории управления. Методы современной теории автоматического управления [Текст] : учеб. в 3-х т. / Н. Д. Егупов, К. А. Пупков. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. Т. 3. – 748 с. – ISBN 5-7038-2194-0.
9. Энциклопедія кібернетики [Текст] : довід. у 2-х т. / Під ред. В. М. Глушков. – К. : Головна редакція УРЕ, 1973. – 583 с.
10. Згуровский М. З. Современная теория управления [Текст] : підруч. / М. З. Згуровский. – К. : УМК ВО, 1989. – 195 с.
11. Изерман Р. Цифровые системы управления [Текст] : моногр. ; [пер. с нем.]. / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 541 с.

12. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии [Текст] : моногр. / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 448 с.
13. Копченкова Н. В. Вычислительная математика в примерах и задачах [Текст] : учеб. пособ. / Н. В. Копченкова, Н. А. Марон. – М. : Наука, 1972. – 368 с.
14. Красовский А. А. Справочник по теории автоматического управления [Текст] : справоч. / А. А. Красовский. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
15. Льюнг Л. Идентификация систем [Текст] : моногр. / Л. Льюнг. – М. : Наука, 1991. – 431 с.
16. Медведев Р. Б. АСУ ТП в металлургии [Текст] : учеб. пособ. / Р. Б. Медведев, Ю. Д. Бондарь, В. Д. Романенко. – М. : Металлургия, 1987. – 261 с.
17. Медведев Р. Б. Система автоматизированного управления процессом синтеза аммиака из коксового газа [Текст] / Р. Б. Медведев, А. С. Минаков, А. В. Федоров // Кокс и химия. – 1982. – № 11 – С. 43–46.
18. Медведев Р. Б. Керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. / Р. Б. Медведев. – К. : ІСДО, 1994. – 160 с.
19. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы [Текст] : учеб. пособ. / И. В. Мирошник. – СПб. : Питер, 2005. – 336 с. – ISBN 5-469-00350-7.
20. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы [Текст] : учеб. пособ. / И. В. Мирошник. – СПб. : Питер, 2006. – 271 с. – ISBN 5-469-00351-5.
21. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии [Текст] : учеб. для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – М. : Химия, 1987. – 495 с.
22. Подчукаев В. А. Теория автоматического управления (аналитические методы) [Текст] : учеб. для вузов / В. А. Подчукаев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 392 с. – ISBN 5-9221-0445-4.
23. Райбман Н. С. Построение моделей процессов производства [Текст] : моногр. / Н. С. Райбман, В. М. Чадеев. – М. : Энергия, 1975. – 375 с.



24. Рей У. Методы управления технологическими процессами [Текст] : моногр. ; [пер. с англ.] / У. Рей. – М. : Мир, 1983. – 368 с.
25. Скурихин В. И. АСУ ТП. Предпроектная разработка алгоритмов управления [Текст] : моногр. / В. И. Скурихин, В. В. Дубровский, В. В. Шифрин. – К. : Наук. думка, 1980. – 294 с.
26. Стефани Е. П. Основы построения АСУ ТП [Текст] : учеб. пособ. / Е. П. Стефани. – М. : Энергоиздат, 1982. – 351 с.
27. Ту Ю. Т. Современная теория управления [Текст] : моногр. ; [пер. с англ.] / Ю. Т. Ту. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.
28. Хемминг Р. В. Численные методы [Текст] : учеб. / Р. В. Хемминг. – М. : Наука, 1972. – 398 с.
29. Чакри Ф. Современная теория управления [Текст] : моногр. / Ф. Чакри. – М. : Мир, 1975. – 424 с.
30. Brack G. Prozess und Regelkreisdynamik [Text] : Berechnung mit BASIC / G. Brack. – Berlin : Verl. Technik, 1988. – 88 S: Ill. – (Reihe Automatisierungstechnik, ISSN 0484-3436 ; N232). – ISBN 3-341-00531-5 : 2.00 p.

Навчальне видання

Медведєв Ромуальд Броніславович

**Керування  
хіміко-технологічними процесами**

Навчальний посібник

*Видання друге, виправлене і доповнене*

Редактор *К. А. Нагорна*  
Комп'ютерна верстка *В. Х. Заволодько*

Темплан 2011 р., поз. 1-2-027

Підш. до друку 18.10.2012. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – офсет. Ум. друк. арк. 11,16. Обл.-вид. арк. 18,56. Наклад 400 пр. Зам. № 12-247.

---

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»  
Свідчення ДК № 1665 від 28.01.2004 р.  
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
тел. (044) 406-81-78